ISSN 1992-5980

ВЕСТНИК

ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Том 8 №3(38)

2008

ВЕСТНИК
ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2008

Т.8 №3(38)

Теоретический и научно-практический журнал

Рекомендован ВАК для публикаций результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени доктора наук по направлению «Машиностроение» и кандидата наук по направлениям: «Управление, вычислительная техника и информатика», «Инженерно-агропромышленные специальности»

Издается с 1999 г.
Выходит один раз в квартал
СЕНТЯБРЬ 2008 г.

Учредитель – **Донской государственный технический университет**

Главный редактор д-р техн. наук Б.Ч. Месхи
Зам. главного редактора д-р техн. наук И.В. Богуславский
Ответственный секретарь д-р техн. наук В.П. Димитров

Редакционная коллегия:

Направление «Управление, вычислительная техника и информатика»:
д-р техн. наук Р.А.Нейдорф, д-р техн. наук М.Е.Попов,
д-р техн. наук Б.В.Соболь, д-р техн. наук А.К.Тугенгольд

Направление «Инженерно-агропромышленные специальности»:
академик РАСХН, д-р техн. наук И.А.Долгов, д-р техн. наук В.П.Жаров,
д-р техн. наук Ю.И.Ермольев, д-р техн. наук И.А.Хозяев,
д-р техн. наук О.А.Полушкин

Направление «Машиностроение»:
д-р техн. наук А.П.Бабичев, д-р техн.наук В.Л.Заковоротный,
д-р техн. наук А.С.Кужаров, д-р техн. наук В.Ф.Лукьянов,
д-р техн. наук В.Г.Люлько, д-р техн. наук В.Н.Пустовойт,
д-р техн. наук Ю.Н.Резников, д-р техн. наук А.А.Рыжкин,
д-р техн. наук В.С.Сидоренко, д-р техн. наук А.Н.Соловьев,
д-р техн. наук М.А.Тамаркин, д-р техн. наук А.Н.Чукарин

Над номером работали: В.Ф.Лавриченко, Е.В.Хейгетян, И.В.Кикичева

Подписано в печать 16.09.2008.
Формат 30x42/8. Гарнитура «Tahoma». Печать офсетная.
Усл.печ.л. 18,2. Тираж 1000 экз. Заказ 498. Цена свободная

Адрес редакции:
344000, г.Ростов-на-Дону, пл.Гагарина, 1,
тел. 2-738-747

Адрес издательского центра:
344000, г.Ростов-на-Дону, пл.Гагарина, 1,
тел. 2-738-741, 2-738-322

www.donstu.ru/vestnik
www.dstu.ru/vestnik/index.html
Регистрационное свидетельство № ПИ № ФС 10-6367

© Издательский центр ДГТУ, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Нейдорф Р.А., Фан Н.Х. Обобщённый анализ динамической системы на наличие признаков жордановой формы 211

Ремизов Э.В., Лукьянов Е.А. Интеллектуальный мониторинг шпиндельного узла на базе нечеткой логики..... 221

Паршин Д.Я., Винокуров М.Р. Приведение вихревого магнитного поля к потенциальному полю источников..... 226

Могилевская Н.С., Скоробогат В.Р., Чудаков В.С. Экспериментальное исследование декодеров кодов Рида-Маллера второго порядка..... 231

Сумбатян М.А., Шевцов С.Е. Алгоритм цифровой обработки акустических сигналов аудиофайлов и их распознавание на основе объективных критериев..... 238

Атрощенко О.И. Синергетический синтез управлений для нелинейного объекта управления..... 245

Ахвердиев К.С., Чудинов Г.В., Фомичев Е.В., Ахвердиева М.К. Математическое моделирование стратифицированного течения крови в кровеносном сосуде в виде модели раздельного течения двух несмешивающихся жидкостей в сужающейся конической трубке..... 252

Симанков В.С., Владимиров С.Н., Денисенко А.О., Черкасов А.Н. Методологические аспекты построения систем поддержки принятия решений..... 258

ИНЖЕНЕРНО-АГРОПРОМЫШЛЕННЫЕ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

Игнатенко И.В. Задача терраупругости в почвообработке..... 268

Тугенгольд А.К., Димитров В.П., Борисова Л.В. К вопросу построения нечеткой экспертной системы продукционного типа для технологической регулировки машин..... 278

Ляшенко А.А., Косилов О.Н. Методика и результаты исследования некоторых параметров хлебной массы при ее движении в молотильном зазоре зерноуборочного комбайна..... 287

Липкович И.Э., Петренко Н.В. Производительность зерноуборочных агрегатов как человекомашинных систем..... 292

Гелеверов В.Н., Дьяченко А.Д. Самоходные зерноуборочные комбайны как объекты гидрофикации..... 299

Ермольев Ю.И., Кочкин М.Ю. Фракционные технологии очистки зерна продовольственного назначения..... 308

Радин В.В., Куручук С.В., Гнутов М.С. К вопросу о неголономной связи в приводе молотильного барабана зерноуборочного комбайна в режиме разгона..... 317

Ермольев Ю.И., Мартыненко А.И., Бутовченко А.В. Моделирование процесса сепарации зерна в воздушно-решётной зерноочистительной машине..... 324

Жаров В.П., Игнатенко В.И. Математическая модель напряжённо-деформируемого состояния пружинного зуба культиватора на микроуровне в полярных координатах..... 334

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Людмирский Ю.Г., Пархоменко А.А. Метод оценки напряженного состояния в зоне перехода от шва к основному металлу..... 340

Пустовойт В.Н., Мульчин В.В., Домбровский Ю.М. Конструктивная прочность трубных сталей со структурой естественного феррито-мартенситного композита..... 348

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

УДК 681.513.5

Р.А. НЕЙДОРФ, Н.Х. ФАН

ОБОБЩЁННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА НАЛИЧИЕ ПРИЗНАКОВ ЖОРДАНОВОЙ ФОРМЫ

Предложен эффективный аналитический метод изучения многомерных систем с целью выделения в них управляемых подсистем жордановой формы. Построены математическая модель и алгоритм оценки наличия жордановых признаков у управляемых многомерных систем, на основе которых может быть реализована их декомпозиция в жордановы подсистемы.

Ключевые слова: *динамическая система, жорданова форма, декомпозиция, подсистема, переменная состояния.*

Постановка задачи. Задана многомерная система n-го порядка с m входами $(m \le n)$

$$\dot{x}_i = f_i\left(x_1, x_2, ..., x_n, u_1, u_2, ..., u_m\right),\ i = \overline{1,n}, \tag{1}$$

где $\forall i = \overline{1,n}, j = \overline{1,m} \to f_i(0) = 0,\ \partial^2 f(\circ)_i / \partial u_j^2 = 0$, а функции $f_i(\circ)$ - дифференцируемы по своим переменным.

Требуется найти возможность представить её в виде совокупности подсистем жордановой формы [1,2], т.е.

$$\left.\begin{aligned} &\dot{x}_{ij} = f_{ij}\left(x_{1j}, x_{2j}, \ldots x_{(i+1)j}\right),\ i = \overline{1, n_j - 1};\\ &\dot{x}_{n_j j} = f_{nj}\left(x_{1j}, x_{2j}, \ldots x_{nj}\right) + g_j\left(x_{1j}, x_{2j}, ..., x_{nj}\right)\cdot u_j(x);\\ &j = \overline{1,m}, \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

где $\forall i < n \to \partial f_{ij}(\circ) / \partial x_{(i+1)j} \neq 0$.

Таким образом, если система (1) имеет скалярное управление ($m = 1$) и описывается системой дифференциальных уравнений формы Жордана, то её математическая модель имеет вид:

$$\dot{x}_i = f_i\left(x_1, x_2, \ldots x_{i+1}\right),\ i = \overline{1, n-1};\ \dot{x}_n = f_n\left(x_1, x_2, \ldots x_n\right) + g\left(x_1, x_2, ..., x_n\right)\cdot u(x), \tag{3}$$

где $\forall i < n \to \partial f_i(\circ) / \partial x_{i+1} \neq 0$.

Идентификационные признаки жордановых систем. Цель анализа заключается в поиске обобщенных свойств, служащих критерием «жордановости». Для проверки системы со скалярным управлением на «жордановость» формы можно анализировать символьное совпадение математической модели (ММ) системы с формой (2), начиная с уравнения, содержащего управление u в явной форме. В связи с этим форму (3) можно считать базовым критерием «жордановости». Однако такой подход не даёт удобного критерия, так как символьный анализ математического выражения гро-

моздок. Кроме того, способ записи может быть различным, и его нужно регламентировать.

Для отыскания более эффективного критерия следует отметить, что для жордановой системы в (2) важную роль играет первая переменная состояния (ПС) x_1, так как явно её могут определять только остальные ПС, но не управление u. Если известно, что какая-то переменная является первой ПС для жордановой системы, то легко последовательно определить следующие переменные. Из этого можно заключить, что первая ПС определяет жордановую систему. Иначе говоря, если у некоторой переменной состояния x_i изучаемой системы обнаружатся свойства первой ПС жордановой системы, то изучаемая система «жорданова» и x_i является ее первой переменной состояния.

Исходя из сказанного, определение критерия «жордановости» системы можно заменить определением критерия первой переменной жордановой системы.

***Утверждение* 1.** Пусть задана система n-го порядка со скалярным управлением $u(x)$ и произвольной последовательностью определения ПС:

$$\dot{x}_i = F_i(x,u), i = \overline{1,n};\ x = (x_1, x_2, ..., x_n). \tag{4}$$

Система (4) является жордановой с первой переменной состояния x_k тогда и только тогда, когда выполняется условие:

$$\frac{\partial}{\partial u^{(i)}}\left(\frac{d^{n-1}x_k}{dt^{n-1}}\right) = 0,\ i = 0,1,...;\ \frac{\partial}{\partial u}\left(\frac{d^n x_k}{dt^n}\right) \neq 0, \tag{5}$$

где полная производная от x_k вычисляется по рекурсивной формуле

$$\frac{dx_k}{dt} = F_k(x,u);\ \frac{d^i x_k}{dt^i} = \sum_{j=1, x_j \in \Omega_{i-1}}^{n} \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{d^{i-1}x_k}{dt^{i-1}}\right) \cdot F_j(x,u) +$$

$$+ \sum_{j=0, u^{(j)} \in \Omega_{i-1}} \frac{\partial}{\partial u^{(j)}}\left(\frac{d^{i-1}x_k}{dt^{i-1}}\right) \cdot u^{(j+1)},\ i = 2,...,$$

в которой Ω_{i-1} есть множество аргументов $\frac{d^{i-1}x_k}{dt^{i-1}}$.

Доказательство. Прямое утверждение есть свойство первой переменной состояния системы (1) в её записи вида (3). Нетрудно заметить, что в (3) управление $u(x)$ влияет на первую переменную x_1 ровно через n интеграторов, где n - порядок системы. Отсюда можно легко проверить следующее её свойство:

$$\frac{\partial}{\partial u^{(i)}}\left(\frac{d^{n-1}x_1}{dt^{n-1}}\right) = 0,\ i = 0,1,...\ ;\ \frac{\partial}{\partial u}\left(\frac{d^n x_1}{dt^n}\right) \neq 0, \tag{6}$$

где $u^{(i)}$ - i-я производная от управления u. Таким образом, если перенумеровать ПС системы (1), обозначив $x_k = x_1^*$ и $x_l = x_n^*$ для ПС уравнения $\dot{x}_l = F_l(x,u)$, можно обнаружить эквивалентность условий (5) и (6).

Теперь нужно доказать обратное утверждение: если условие (6) выполняется, то система (4) «жорданова» и ее первой ПС является x_k. Из

первого равенства условия (6) формально получается, что $x_k^{(n-1)} = s_{n-1}(x)$, где $s_{n-1}(\circ)$ - некоторая функция ПС, не содержащая u, а из неравенства условия (6) следует, что в уравнении $x_k^{(n)} = s_n(x,u)$ присутствует u. Поскольку при этом развёрнутое выражение для n-й производной имеет вид

$$\frac{d^n x_k}{dt^n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{d^{n-1}x_k}{dt^{n-1}}\right)\cdot\frac{dx_i}{dt} = \sum_{i=1}^{n}\frac{\partial s_{n-1}}{\partial x_i}\cdot\frac{dx_i}{dt}, \qquad (7)$$

можно заключить, что аргументом функции $s_{n-1}(\circ)$ должна быть хотя бы одна переменная x_{j_n}, $j_n \in (1,2,...,n)$, такая, что

$$d^{n-1}x_k / dt^{n-1} = s_{n-1}(x) = s_{n-1}\left(x \setminus \{x_{j_n}\}, x_{j_n}\right),$$

где $\dot{x}_{j_n} = f_{j_n}(x,u)$. Здесь $x \setminus \{x_{j_n}\}$ обозначает вычитание из множества $x = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$ множество $\{x_{j_n}\}$.

Рассуждая аналогично, можно сделать вывод, что в $s_{n-2}(\circ)$ не должны быть x_{j_n} и u, но должна присутствовать $x_{j_{n-1}}$, такая, что $\dot{x}_{j_{n-1}} = f_{n-1}\left(x \setminus \{x_{j_n}\}, x_{j_n}\right)$, а $f_{n-1}(\circ)$ не должна содержать аргументов, производные которых содержат $\dot{u}$. Тогда

$$\dot{x}_{j(n-2)} = s_{n-2}(x) = s_{n-2}\left(x \setminus \{x_{j_{n-1}}, x_{j_n}\}, x_{j_{n-1}}\right).$$

Продолжая аналогично для производных меньших порядков x_k можно придти к системе уравнений:

$$\left.\begin{aligned}
&\left(x \setminus \{x_{j_2}, x_{j_3}, ..., x_{j_n}\}, x_{j_2}\right) = s_1\left(x_k, x_{j_2}\right)\\
&\dot{x}_{j_2} = f_2\left(x \setminus \{x_{j_3}, ..., x_{j_n}\}, x_{j_3}\right) = f_2\left(x_k, x_{j_2}, x_{j_3}\right)\\
\dot{x}_k = s_1 &\cdots\\
&\dot{x}_{j_i} = f_i\left(x \setminus \{x_{j_{i+1}}, ..., x_{j_n}\}, x_{j_{i+1}}\right) = f_i\left(x_k, x_{j_2}, ..., x_{j_i}, x_{j_{i+1}}\right)\\
&\cdots\\
&\dot{x}_{j_n} = f_n(x,u) = f_n\left(x_k, x_{j_2}, ..., x_{j_n}, u\right)
\end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

где $x = (x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n) \equiv (x_k, x_{j_2}, x_{j_3}, \ldots, x_{j_n})$.

Система (8) - это форма жордановой системы с первой переменной x_k, значит, исходная система является жордановой и x_k - ее первая переменная.

Утверждение доказано.

Доказательство утверждения 1 показывает, что условие (6) можно считать критерием «жордановости» системы со скалярным управлением, причём критерий этот вполне формализован. Для проверки системы на «жордановость» по критерию (6) достаточно одного цикла по переменным состояниям. Если какая-то переменная системы (1) общего вида удовлетворяет критерию (6), то система жорданова и эта переменная является первой переменной состояния системы.

Следует заметить, что в случае скалярного управления, проверка «жордановости» системы по критерию (5) совсем не проще проверки по форме (3). Однако в случае векторного управления на основе формы (3) вообще затруднительно определить условия наличия жордановых подсистем, а на основе критерия (6) это оказывается возможным.

Формализация понятия жордановых подсистем. Согласно поставленной задаче надо выяснить, какие структуры имеют жордановы подсистемы многомерной системы (1) и по какому критерию они выделяются. Для этого нужно ввести дополнительные определения.

***Определение* 1.** Жорданова подсистема n_p -го порядка с управлением u_j системы (1) имеет вид;

$$\left.\begin{aligned}
&\dot{x}_{p,1} = f_{p,1}\left(x_{p,1}, x_{p,2}, \ldots\right);\\
&\dot{x}_{p,2} = f_{p,2}\left(x_{p,1}, x_{p,2}, x_{p,3}, \ldots\right);\\
&\ldots\\
&\dot{x}_{p,n_p-1} = f_{p,n_p-1}\left(x_{p,1}, x_{p,2}, \ldots, x_{p,n_p}, \ldots\right);\\
&\dot{x}_{p,n_p} = f_{p,n_p}\left(x_{p,1}, x_{p,2}, \ldots x_{p,n_p}, u_j, \ldots\right).
\end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

Здесь $x_{p,1}, x_{p,2}, \ldots, x_{p,n_p} \in \left(x_1, x_2, \ldots, x_n\right)$ и считаются переменными состояния этой подсистемы. В подсистеме (9) могут присутствовать другие переменные состояния системы (1) и другие управления, но эти величины считаются параметрическими внешними воздействиями. В общем случае нельзя гарантировать, что производные других переменных в (9) не содержат u_j или других управлений. Поэтому в таких задачах, как синтез u_j, могут возникнуть обратные дифференциальные операторы в контуре управления. Следовательно, форма (3) не обеспечивает удобной процедуры построения подсистем (9) для синтеза законов управления. Для эффективного применения необходимо ввести на подсистемы дополнительные ограничения, и критерий (5) будет здесь полезным.

***Определение* 2.** Подсистема (9) является **локально жордановой** (ЛЖ) относительно первой переменной состояния $x_{p,1}$, если

$$\frac{\partial}{\partial u_j^{(i)}}\left(\frac{d^{n_p-1}x_{p,1}}{dt^{n_p-1}}\right) = 0,\ i = 0,1,\ldots; \quad \frac{\partial}{\partial u_j}\left(\frac{d^{n_p}x_{p,1}}{dt^{n_p}}\right) \neq 0. \qquad (10)$$

***Определение* 3.** Подсистема (9) является **глобально жордановой** (ГЖ) относительно первой переменной состояния $x_{p,1}$, если

$$\forall r = \overline{1,m} \rightarrow \ \frac{\partial}{\partial u_r^{(i)}}\left(\frac{d^{n_p-1}x_{p,1}}{dt^{n_p-1}}\right) = 0,\ i = 0,1,\ldots; \ \frac{\partial}{\partial u_j}\left(\frac{d^{n_p}x_{p,1}}{dt^{n_p}}\right) \neq 0. \qquad (11)$$

Определения 2 и 3 играют важную роль для эффективного применения методов синтеза u_j к подсистеме (9). Поэтому нужно исследовать возможности и построить алгоритмы декомпозиции многомерной системы (1) на глобально жордановы подсистемы.

Алгоритм исследования возможности декомпозиции многомерных систем на m глобально жордановых подсистем*. Ввиду ограниченной размерности управляемых систем алгоритм основан на организации поиска всех вариантов декомпозиции. При этом, кроме ограничения структуры глобально жордановой подсистемы при декомпозиции, подсистемы должны удовлетворять следующим условиям между собой.

***Условие* 1.** Объединение подсистем совпадает с исходной системой (1). Это условие обеспечивает общую корректность декомпозиции системы (1).

***Условие* 2.** Переменные состояния подсистем взаимно не совпадают, т.е.

$$\forall jk, jl = \overline{1,m};\ ik = \overline{1,n_{jk}};\ il = \overline{1,n_{jl}} \rightarrow\ jk \neq jl;\ x_{jk,ik} \neq x_{jl,il},$$

где jk, jl - порядковые номера; n_{jk}, n_{jl} - порядки подсистем соответственно.

Это условие играет роль в обеспечении однозначности решения задачи синтеза.

По критерию (11) при соблюдении условий У1 и У2 алгоритм поиска вариантов декомпозиции будет состоять из двух основных этапов.

1. Для каждого управления u_j составить множество глобально жордановых подсистем с управлением u_j по критерию (11), получив, в результате m множеств (в соответствие с размерностью вектора управления).

2. Из m полученных множеств необходимо построить все комбинации по m подсистем. Из полученного множества комбинаций следует исключить все неудовлетворяющие условиям У1 и У2. Если оставшееся подмножество комбинаций пусто, то система (1) не декомпозируема на глобально жордановы подсистемы, иначе оставшееся подмножество содержит все возможные варианты декомпозиции системы (1) на глобально жордановы подсистемы.

Этап 1 следует рассмотреть подробнее. Он может состоять из трех шагов.

1.1. Выбрать очередное управление u_j

1.2. Найти все переменные состояния системы (1), которые удовлетворяют критерию (11), т.е. для которых существует число $n_p > 0$ по критерию (11). Найденные переменные состояния являются первыми переменными состояния некоторых глобально жордановых подсистем.

1.3. Для каждой переменной x_i из найденных переменных выделить из (1) все варианты промежуточных переменных состояния, каждый вариант даёт одну глобально жорданову подсистему с первой переменной состояния x_i. Добавить выделенные подсистемы во множество подсистем с управлением u_j. В конечном результате во множестве подсистем с управлением u_j находятся глобально жордановы подсистемы.

* Здесь предполагается, что управлением j-й подсистемы является u_j, $j = \overline{1,m}$.

Алгоритм гарантирует, что если существует комбинация подсистем по условиям У1, У2, то эта комбинация найдется, иначе говоря, алгоритм не пропускает решений.

Иллюстративный пример. Пусть задана система 5-го порядка с двумя входами:

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 - x_2; \\ \dot{x}_2 &= -x_1 + x_2 - x_3 + x_5; \\ \dot{x}_3 &= u_1; \\ \dot{x}_4 &= x_3 + x_5; \\ \dot{x}_5 &= u_2. \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

Нужно исследовать возможности декомпозиции системы (12) на основе предложенного алгоритма поиска.

Этап 1. Составляется множества глобально жордановых подсистем с u_1 и u_2.

1.1. В качестве очередного выбирается управление u_1.

1.2. Находится число n_p для всех переменных состояния:

для x_1

$$\dot{x}_1 = -x_1 - x_2,\ \ddot{x}_1 = -\dot{x}_1 - \dot{x}_2 = -(-x_1 - x_2) - \left(-x_1 + x_2 - x_3 + x_5\right),$$
$$\dddot{x}_1 = f\left(x_1, x_2, x_3, x_5, \dot{x}_3, \dot{x}_5\right) = f\left(x_1, x_2, x_3, x_5, u_1, u_2\right),$$

значит, для x_1 $n_1 = 3$; аналогично для x_2 $n_2 = 2$, для x_3 - $n_3 = 1$, а для x_4 - $n_4 = 2$.

1.3. Находится множество глобально жордановых подсистем с управлением u_1:

подсистемы с первой переменной состояния x_1: (x_1, x_2, x_3);
подсистемы с первой переменной состояния x_2: (x_2, x_3);
подсистемы с первой переменной состояния x_3: (x_3);
подсистемы с первой переменной состояния x_4: (x_4, x_3).

Множеством глобально жордановых подсистем с управлением u_1 является множество {(x_1, x_2, x_3), (x_2, x_3), (x_3), (x_4, x_3)}.

Аналогично для u_2 множеством глобально жордановых подсистем с управлением u_2 является множество {(x_1, x_2, x_5), (x_4, x_5),(x_2, x_5),(x_5)}

Этап 2. Полный перебор всех комбинаций:
комбинация 1 {(x_1, x_2, x_3),(x_1, x_2, x_5)};
комбинация 2 {(x_1, x_2, x_3),(x_4, x_5)};
комбинация 3 {(x_4, x_3),(x_1, x_2, x_5)};
комбинация 4 {(x_4, x_3),(x_4, x_5)};
.....

Количество комбинаций – мощность декартового произведения множеств и равно 4*4=16. Среди этих комбинаций только комбинации 2 и 3 удовлетворяют У1 и У2, т.е существуют приведённые ниже в таблице два варианта декомпозиции.

Варианты декомпозиции

Вариант 1	
ГЖ11 подсистема с управлением u_1 вида $\begin{cases}\dot{x}_1 = -x_1 - x_2;\\ \dot{x}_2 = -x_1 + x_2 - x_3 + x_5;\\ \dot{x}_3 = u_1.\end{cases}$	ГЖ12 подсистема с управлением u_2 вида $\begin{cases}\dot{x}_4 = x_3 + x_5;\\ \dot{x}_5 = u_2.\end{cases}$
Вариант 2	
ГЖ21 подсистема с управлением u_1 вида $\begin{cases}\dot{x}_4 = x_3 + x_5;\\ \dot{x}_3 = u_1.\end{cases}$	ГЖ22 подсистема с управлением u_2 вида $\begin{cases}\dot{x}_1 = -x_1 - x_2;\\ \dot{x}_2 = -x_1 + x_2 - x_3 + x_5;\\ \dot{x}_5 = u_2.\end{cases}$

Известно [1,2], что для жордановых систем со скалярным управлением можно легко найти законы управлении с использованием методов, ориентированных на соподчинённость переменных состояния, начиная с первой, в этой форме записи. Для линейных систем в этом случае хорошо работает методика синтеза модального управления. Для нелинейных случаев разрабатываются различные частные подходы [3]. В частности, для любой из подсистем приведённой выше таблицы можно найти квазиоптимальное по быстродействию управление по методике соподчинённого синтеза [4-6]. Поэтому для системы (12) оказывается возможным синтезировать векторный вариант квазиоптимального по быстродействию управления на основе декомпозиции её на жордановы подсистемы по любому из представленных в таблице вариантов.

Например, если взять за основу две подсистемы ГЖ21 (x_4, x_3, u_1) и ГЖ22 (x_1, x_2, x_5, u_2) варианта 2, то можно осуществить для них синтез векторного квазиоптимального по быстродействию управления на основе методики, разработанной для скалярного случая. Использование рекуррентных формул соподчинённого подхода [4,5] к каждой подсистеме позволяет получить выражения для каждой из составляющих векторного управления: u_1 и u_2 (эти формулы не приведены из-за громоздкости).

На рис.1 показан результат моделирования синтезированного управления подсистемами при следующих начальных условиях: $x_1(0) = 1$, $x_2(0) = x_3(0) = x_4(0) = x_5(0) = 0$ и ограничениях $|u_1| \le 1, |u_2| \le 1$. Это соответствует подавлению возмущённого состояния первой переменной второй подсистемы. Анализ переходных процессов показывает корректность получаемого результата. Составляющие векторного управления изменяются согласованно: x_4 остаётся на нулевом значении, а x_1 стремится к стационарной точке по траектории, отклоняющейся от оптимальной по быстродействию в соответствии с принятыми для синтеза настройками квазиоптимальности ε [4].

На рис. 2 приведён результат моделирования синтезированного управления подсистемами при других начальных условиях: $x_1(0) = 1$,

$x_4(0)=0.5$, $x_2(0)=x_3(0)=x_5(0)=0$ и ограничениях $|u_1|\le 1, |u_2|\le 1$. Здесь управления u_1 и u_2 уже не симметричны, но x_1 переводится в стационарную точку по той же квазиоптимальной траектории, а x_4 при этом также апериодически доводится до точки стационарности, но за меньшее время, так как подсистема этой основной (первой) переменной имеет меньший порядок.

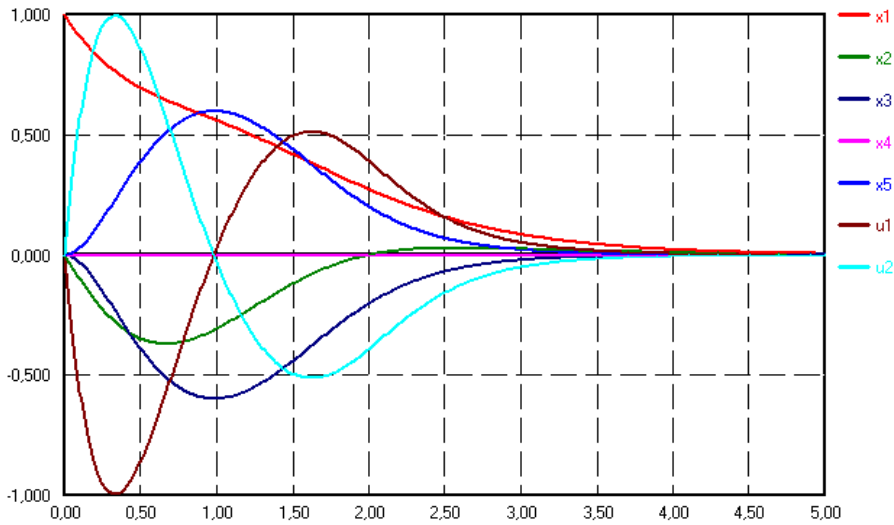


Рис.1. Переходные процессы при устранении возмущения по x_1

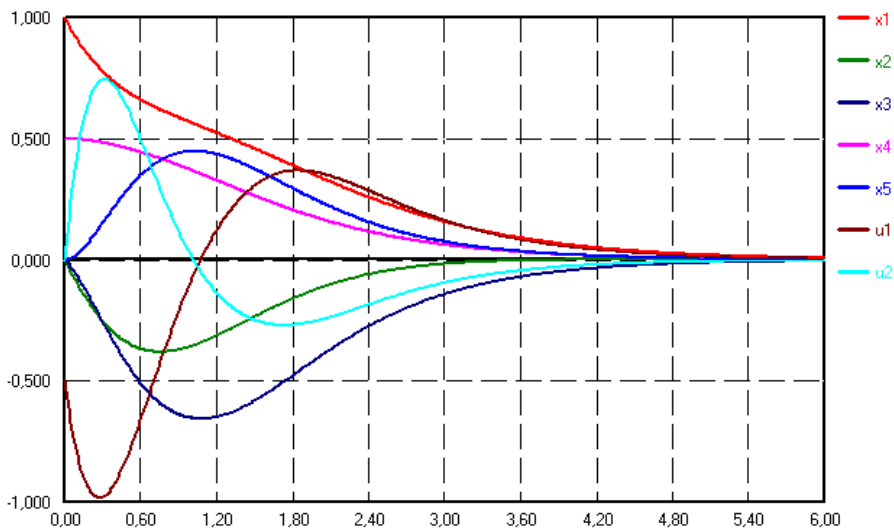


Рис. 2 Переходные процессы при устранении возмущений по x_1 и x_4

Вывод. Предложенный в статье новый подход к анализу жордановости динамических систем и подсистем, рассматриваемых как объекты управления, хорошо формализован и всегда даёт возможность декомпозиции многомерных систем управления на жордановы подсистемы, если она возможна.

Библиографический список

1. *Гайдук А.Р.* Новая управляемая форма нелинейных уравнений динамических объектов / А.Р. Гайдук // Сб. тр. МНК. ММТТ18. - Т.2. - Казань, 2005. - С.88-90.

2. *Гайдук А.Р.* Приведение уравнений объектов третьего порядка к управляемой форме Жордана / А.Р. Гайдук // Сб. тр. МНК. ММТТ19. - Т.2. - Воронеж , 2006. - С.115-118.

3. *Гайдук А.Р.* Решённые и нерешённые математические проблемы современной теории управления// Системный анализ, управление и обработка информации: сб. науч. ст.; под общ. ред. проф. Р.А.Нейдорфа. – Ростов н/Д-Таганрог: ДГТУ; ТТИ ЮФУ, 2007. - С.18-27.

4. *Нейдорф Р.А.* Синтез законов квазиоптимального по быстродействию управления на основе динамической аппроксимации/ Р.А. Нейдорф, Н.Н. Чан // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-19: сб. тр. междунар. науч. конф. - Воронеж, 2006. - Т.2. - С.10-113.

5. *Чан Н.Н.* Композиционный синтез квазиоптимальных по быстродействию систем управления высокого порядка // Вестник ДГТУ. -2007. - №4.

6. *Чан Н.Н.* Синтез законов квазиоптимального по быстродействию управления объектами высокого порядка/ Н.Н. Чан: дисс. … техн. наук. 05.13.01. – Ростов н/Д, 2007.

Материал поступил в редакцию 31.07.08.

R.A. NEYDORF, N.H.PHAN

GENERALISED ANALYSIS OF A DYNAMIC SYSTEM FOR THE PRESENCE OF SIGNS OF THE JORDAN FORM

An efficient analytical method of studying multidimensional systems with a purpose of extracting controllable sub-systems of the Jordan forms is presented. A mathematical model and algorithms for estimation of the presence of "Jordan" signs in controllable multidimensional systems on the basis of which a decomposition of these multidimensional systems into Jordan sub-systems has been built.

НЕЙДОРФ Рудольф Анатольевич (р.1944), заведующий кафедрой «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» (ПОВТ и АС) ДГТУ, доктор технических наук (1988), профессор (1994). Окончил Новочеркасский политехнический институт (1967) по специальности «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов».
Основные направления научной деятельности: синтез и структурно-параметрическая оптимизация законов управления, процессы обработки информации и управления в технических системах.
Автор около 200 научных работ, издано 11 учебных пособий общим объемом более 80 п.л. Имеет 34 авторских свидетельства на изобретения и 4 свидетельства о регистрации программ.

ФАН Нгуен Хай (р.1979), аспирант 3 года обучения кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» ДГТУ. Окончил ДГТУ (2005) по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем».
Научные интересы: современные методы анализа и синтеза систем автоматического управления, моделирование процессов управления на ЭВМ.
Автор 7 научных работ.

УДК 621.396+681.518

Э.В.РЕМИЗОВ, Е.А.ЛУКЬЯНОВ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Приведены основные принципы построения системы мониторинга состояния шпиндельного узла токарного модуля на базе нечеткой логики. Проанализированы различные факторы, влияющие на точность обработки изделий на станках с ЧПУ и выбраны основные, влияние которых существенно. Представлена нечеткая система мониторинга и данные экспериментальной проверки результата работы разработанной системы.

Ключевые слова: *мониторинг, нечеткая логика, температурные деформации.*

Введение. Точность размера, формы и взаиморасположения поверхностей при лезвийной обработке деталей на металлорежущих станках определяется точностью взаиморасположения и относительных перемещений инструмента и заготовки. Естественным направлением обеспечения точности оборудования является повышение жесткостных параметров механических подсистем и стабилизация этих параметров как в краткосрочном, так и в длительном временном интервале. Однако в настоящее время для многих конструктивных методов повышения точности станков достигнуты пределы целесообразности их применения, в том числе из-за стоимости реализации. Например, некоторые производители для обеспечения минимальной изменчивости температурных полей станочных подсистем [1] используют термостабилизацию передач винт-гайка, направляющих, шпиндельных узлов (ШУ). Повышение точности обработки в этом случае обеспечивается значительным усложнением конструкции станка и его эксплуатации, включая ремонты и обслуживание. Стоимость таких решений высока и является приемлемой лишь для высокопрецизионного оборудования.

Для обеспечения гарантированной точности обработки деталей на токарном оборудовании предлагается учитывать текущее состояние шпиндельного узла. Это может быть реализовано, в частности, при использовании интеллектуальной системы управлении (ИСУ) [2]. Получение качественной и количественной оценки состояния шпиндельного узла может быть выполнено на основе интеллектуальной системы мониторинга.

Необходимость данной системы обусловлена также тем, что применяемые в настоящее время информационные системы станков с ЧПУ в основном используют информацию, необходимую для контурного, траекторного управления инструментом и не анализируют состояние механической подсистемы станка - жесткость, наличие зазоров и их изменение, изменение температуры, - которые в значительной степени определяют точность станка в каждый конкретный момент времени. В процессе работы имеют место быстро и медленно изменяющиеся параметры механической подсистемы. Полная же проверка характеристик станка является не целесообразной из-за простоя оборудования при выполнении измерений. В условиях промышленной эксплуатации станка возможно организовать текущий кон-

троль за состоянием станочной системы, результаты которого могут быть использованы для корректировки управляющей программы обработки детали.

Постановка цели и задач. Целью исследований является повышение точности изготовления деталей на металлорежущем оборудовании за счет применения системы мониторинга состояния шпиндельного узла. При создании такой системы мониторинга решались следующие задачи:

1) разработка методики качественной оценки состояния шпиндельного узла на основе информации о его температурных полях. Оценка выполняется для основного параметра - радиальной жесткости шпинделя;

2) разработка методики определения текущего значения жесткости, не требующей вывода оборудования из процесса производства и участия оператора;

3) оценка возможности уточнения состояния шпиндельного узла на основе информации о реальных размерах обработанной детали;

4) определение порядка информационного взаимодействия системы мониторинга с интеллектуальной системой управления станком для передачи полученных качественных и количественных оценок состояния ШУ.

Методы решений. Для реализации поставленных задач была разработана система мониторинга состояния шпиндельного узла станка на базе нечеткой логики [3]. Обобщенно система мониторинга ШУ представлена тремя блоками (рис. 1):

1) блок обработки входной информации;

2) блок нечеткой обработки;

3) блок принятия решения;

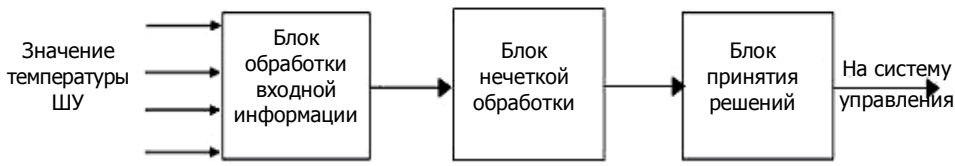


Рис.1. Обобщенная структурная схема нечеткой системы мониторинга состояния ШУ

В качестве входных данных используются значения температуры в четырех точка шпиндельного узла (рис.2), а также расчетное значение радиальной составляющей усилия резания, приложенной к консоли шпиндельного узла. Радиальная жесткость шпинделя в общем случае представляет собой функцию от реально действующей нагрузки, так как присутствуют контактные взаимодействия и деформации тел качения и колец подшипников. Для учета нелинейного характера изменения жесткости использована нечеткая система, которой производится нечеткая оценка состояния шпиндельного узла, а также расчет текущего значения жесткости шпиндельного узла.

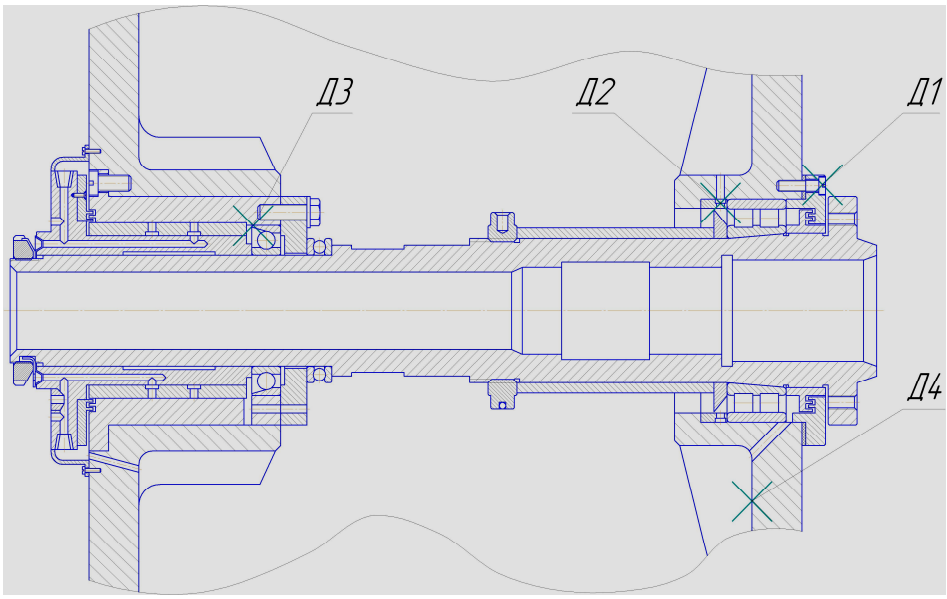


Рис.2. Схема расположения датчиков температуры
Д1,Д2,Д3,Д4-датчики температуры

При реализации системы мониторинга состояния ШУ определялись функции принадлежности входных нечетких переменных, для чего использовалась гибридная нейронная сеть. Функции принадлежности определялись в соответствии с методикой ANFIS, представляющей собой объединение нечетких правил продукции и нейронной сети для обучения системы нечеткой логики. Применяя обученную гибридную нейронную сеть, можно с достаточной для практических целей точностью получать значения жесткости шпиндельного узла в процессе работы станка. Для этого достаточно подать на вход системы мониторинга значения температуры с датчиков, установленных в шпиндельном узле, и нагрузку усилия резания.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Разработанная модель нечеткой системы мониторинга шпиндельного узла проверялась экспериментально. Непосредственные измерения жесткости шпиндельного узла и ее изменения при различных значениях температур контрольных точек шпиндельной бабки позволили сделать следующие заключения. Радиальная жесткость шпинделя при температуре 20 C^0 имеет значение порядка 10^8 Н/м. С ростом температуры шпиндельной бабки имеет место уменьшение (рис.3) радиальной жесткости шпинделя, что объясняется температурными деформациями подшипниковых опор и других элементов шпиндельного узла, до значений порядка 10^7 Н/м.

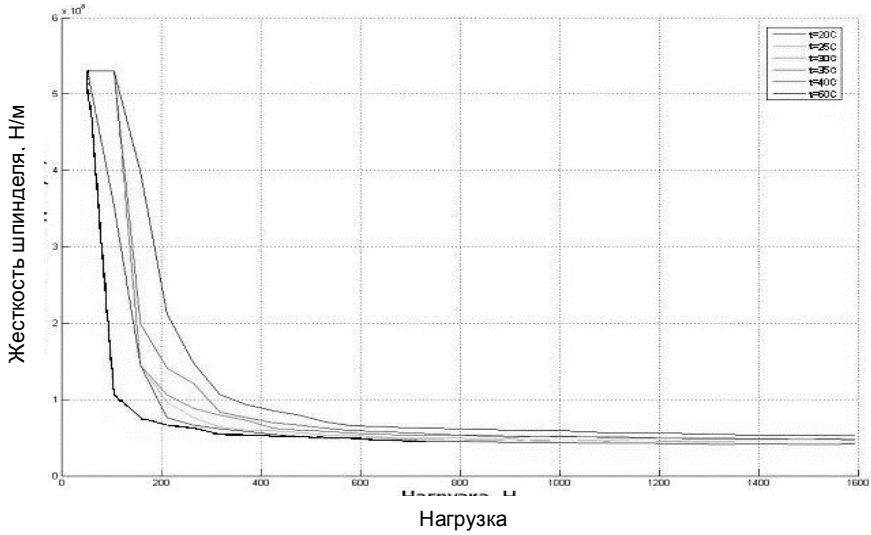


Рис.3. Зависимости жесткости шпиндельных узлов от прикладываемой нагрузки

Проверка нечеткой системы мониторинга выполнялась после уточнения функций принадлежности нечетких переменных и подтвердила возможность осуществления мониторинга состоянии шпиндельного узла станка в процессе его работы.

На рис.4 приведено сравнение экспериментальных данных со значениями системы мониторинга состояния ШУ.

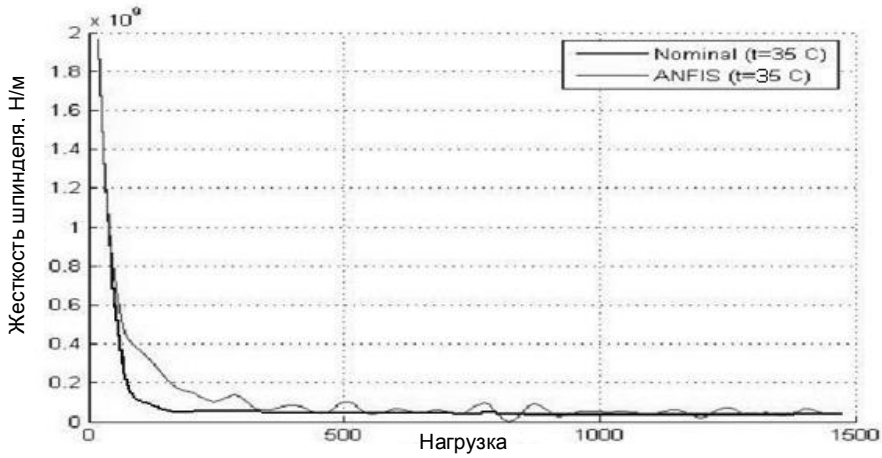


Рис.4. Зависимости жесткости шпиндельных узлов, полученные в результате моделирования (ANFIS), и экспериментальные данные(Nominal)

Выводы. Использование нечеткой логики позволило разработать систему мониторинга состояния ШУ, выполняющей нечеткую оценку состояния шпиндельного узла станка и определяющей текущее значение радиальной жесткости шпинделя на основе информации о температурном поле шпиндельного узла и действующей на шпиндель нагрузки.

Экспериментальная проверка показала соответствие значений жесткости ШУ при изменении его температуры, определенных НС мониторинга.

Применение НС мониторинга может обеспечить повышение точности обработки деталей за счет учета реального состояния ШУ при разработке или коррекции управляющих программ для систем ЧПУ.

Библиографический список

1. *Тугенгольд А.К.* Интеллектуальное управление мехатронными технологическими системами / А.К.Тугенгольд, Е.А.Лукьянов. - Ростов н/д: Издательский центр ДГТУ, 2004 – 117 с.

2. *Тугенгольд А.К.* Система управления станком, обеспечивающая повышенную точность обработки // СТИН. - 1999. - №8. - С.21-26.

3. *Takagi T., Sugeno M.* Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control // IEEE Trans on Systems, Man, Cybern., 15(1), 1985. P. 116–132

Материал поступил в редакцию 21.04.08.

E.V.REMIZOV, E.A.LUKIYANOV

INTELLECTUAL MONITORING SPINDLE NODE ON BASE OF THE FUZZY LOGIC

In article there are brought the cardinal principles of creation of the spindle node condition monitoring system of turning unit based on fuzzy-logic. There will be analyzed different factors, influencing upon accuracy of the processing product on machine tool with CNC and are chose the main influence. The fuzzy-logic monitoring system and experimental checking data of the result of the designed system functioning will be presented.

РЕМИЗОВ Эдуард Викторович (р.1982), аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов» ДГТУ. Окончил ДГТУ (2006).
Научные интересы: системы искусственного интеллекта, адаптивные системы управления.
Автор 5 научных публикаций.

ЛУКЬЯНОВ Евгений Анатольевич (р.1958), кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехника и мехатроника» ДГТУ (1991). Окончил РИСХМ (1981).
Научные интересы: системы искусственного интеллекта, адаптивные системы управления.
Автор 75 научных работ.

УДК 621.3.013.001.572

Д.Я.ПАРШИН, М.Р.ВИНОКУРОВ

ПРИВЕДЕНИЕ ВИХРЕВОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ К ПОТЕНЦИАЛЬНОМУ ПОЛЮ ИСТОЧНИКОВ

В настоящей статье излагается методика расчета и моделирования стационарных и квазистационарных магнитных полей, основанная на преобразовании вихревого магнитного поля в потенциальное поле источников. В результате электрические токи заменяются магнитными зарядами, а уравнения для векторов поля заменяются уравнением для скалярной функции.

Ключевые слова: *моделирование, вихревое магнитное поле, магнитные заряды, потенциальное поле источников, скалярная функция.*

Введение. Метод приведения вихревого магнитного поля к потенциальному полю источников основывается на тождественности магнитных полей системы токов и системы магнитных масс.

Постановка задачи. Суть этого метода заключается в представлении искомого поля вектора $\overline{H}$ в виде суммы расчетного поля $\overline{H}_p$ и вспомогательного поля $\overline{H}_o$:

$$\overline{H} = \overline{H}_p + \overline{H}_o \ . \tag{1}$$

В результате введения вспомогательного поля становится возможным представить систему уравнений, описывающую стационарное магнитное поле, в виде двух систем

$$rot\overline{H}_O = \overline{\delta}\,, \tag{2}$$

$$div\mu\overline{H}o = -\rho_m\,,$$

$$rot\overline{H}\,p = 0\,, \tag{3}$$

$$div\mu\overline{H}\,p = \rho_m\,,$$

одна из которых (система 3) является полным аналогом электростатического поля, для которого можно использовать понятие скалярного магнитного потенциала. В дальнейшем задача определения поля вектора $\overline{H}_p$ заключается в решении уравнения Пуассона:

$$div\mu gradU_m = -\rho_m\,. \tag{4}$$

На выбор поля вектора $\overline{H}_o$ налагается единственное ограничение в виде условия $rot\overline{H}_o = \overline{\delta}$. Многозначность этого уравнения может быть ликвидирована при задании закона распределения величины $div\mu\overline{H}_o$. Однако, если каким-либо образом выбрано удовлетворяющее уравнение $rot\overline{H}_o = \overline{\delta}$ поле $\overline{H}_o$,то значение величины $div\mu\overline{H}_o$ в любой точке пространства определено однозначно. Так, например, можно представить одно из решений, удовлетворяющее указанному условию в виде:

$$\overline{H}_O = \int_{\ell_O}^{\ell} \overline{\delta}(\ell)\times\overline{d\ell}\,, \tag{5}$$

где $\overline{d\ell}$ – координатный вектор; ℓ_o – начальная линия отсчета от заданной точки, линии или поверхности; $\overline{\delta}(\ell)$ - вектор плотности тока, являющийся в общем случае функцией текущей координаты ℓ.

При определении $\overline{H}_o$ по (5) возможен различный выбор направления пути интегрирования, так как ℓ_o и $\overline{d\ell}$ выбираются произвольно. Именно некоторая свобода в выборе $\overline{H}_o$ дает возможность найти оптимальный вариант расчетной модели, позволяющий упростить решение поставленной задачи, так как выбором поля $\overline{H}_o$ определяется объем вычислительной работы при нахождении поля $\overline{H}_p$. Наиболее целесообразным направлением пути интегрирования является такой путь, который обеспечивает в конечном итоге отсутствие объемных магнитных зарядов ρ_m и приводит лишь к возникновению поверхностных магнитных зарядов σ_m. Постановка задачи в таком виде сформулирована как первичная задача минимизации источников, регламентирующая выбор координатных поверхностей так, чтобы вектор $\overline{H}_o$ был на них по возможности постоянным и имел составляющие, касательные к этим поверхностям. Так, например, при анализе существующих конструкций обмоток МГД- генератора целесообразно в качестве исходной системы координат выбрать либо прямоугольную, либо цилиндрическую систему координат. Однако варианты выполнения прямолинейных частей седлообразных обмоток указывают на широкое применение конструкций, имеющих цилиндрическую форму. Поэтому для дальнейшего анализа в качестве основной выбрана седлообразная обмотка, у которой ступенчатое распределение секций обусловлено как технологическими соображениями изготовления и сборки узлов магнитной системы МГД – генератора, так и для уменьшения максимального значения магнитной индукции в лобовой части обмотки. При выбранной системе координат расчет поля $\overline{H}_o$ не представляет трудности. Наибольший объем работ заключается в вычислении скалярного магнитного потенциала U_m, решение для которого в случае однородной среды может быть представлено в виде:

$$U_m = \frac{1}{4\pi\mu}\left[\int_v \frac{\rho_m dv}{r} + \int_{S_\sigma} \frac{\sigma_m dS}{r} + \int_{S_{p_m}} \frac{p_m \cos\psi dS}{r^2}\right], \qquad (6)$$

где p_m - момент двойного слоя магнитных зарядов; ψ - угол между $\overline{p}_m$ и $\overline{r}$, а $\overline{r}$ направлен от точки приложения p_m к точке, в которой определяется U_m.

При решении задачи минимизации областей с объемными магнитными зарядами ρ_m, на поверхностях, ограничивающих токовые зоны, возникает скачок напряженности магнитного поля. Физически это соответст-

вует случаю расположения на поверхностях простого слоя магнитных зарядов:

$$\sigma_m'' = Div\mu(H_{on_1} - H_{on_2}) \tag{7}$$

и поверхностного тока

$$I_S'' = Rot(H_{o\tau_1} - H_{o\tau_2}) \quad , \tag{8}$$

где $H_{on_1}, H_{on_2}, H_{o\tau_1}, H_{o\tau_2}$ – нормальные и касательные составляющие вспомогательного поля вектора $\overline{H}_o$ на границах токовой зоны.

Так как в реальной задаче на поверхности проводника источники отсутствуют, они должны быть компенсированы магнитным слоем с плотностью

$$\sigma_m = -\sigma_m'' \tag{9}$$

и поверхностным током

$$I_S = -I_S'' . \tag{10}$$

Согласно правилу правого винта вектор плотности данного тока должен составлять угол 90^0 с направлением, касательным к вектору $\overline{H}_o$. В целом ряде практических случаев для успешного решения задачи минимизации источников потенциального поля оказывается целесообразным введение двойных слоев магнитных зарядов, эквивалентирующих токовые слои. Такой искусственный прием обеспечивает ограничение эпюры $\overline{H}_{o\tau}$ и в значительной степени облегчает задачу исследования. Величина момента такого двойного слоя $\overline{\rho}_m$ определяется из условия, что скачок касательной составляющей напряженности при переходе через двойной слой определяется скоростью изменения момента двойного слоя в точке перехода:

$$H_{o\tau_\ell} - H_{o\tau_i} = \frac{1}{\mu}\frac{\partial p_m}{\partial \ell_\tau} , \tag{11}$$

где $\overline{p}_m = \overline{n}p_m$; $\overline{H}_{o\tau_\ell}$ и $\overline{H}_{o\tau_i}$ - значение касательных составляющих вектора напряженности $\overline{H}_o$ соответственно с внутренней и внешней стороны двойного слоя.

Отсюда

$$p_m = \mu \int_{L\tau} (H_{o\tau_\ell} - H_{o\tau_i}) d\ell_\tau . \tag{12}$$

Решение уравнения (6) осуществляется с учетом найденного распределения в пространстве простых магнитных слоев с поверхностной плотностью σ_m и двойных магнитных слоев с моментом p_m, либо поверхностного тока I_S.

Каждый частный случай практического приложения данного метода отличается своими особенностями, обусловленными прежде всего реальной геометрией системы и желанием упростить решение поставленной задачи.

Специфической особенностью рассматриваемой задачи является построение расчетной модели источников потенциального поля, которая позволяет одновременно достаточно полно учитывать реальную геометрию исследуемой седлообразной обмотки с учетом переходной области и в максимальной степени минимизировать количество этих источников. Необходимость последнего продиктована прежде всего требованием создания эффективной оптимизационной программы, в которой вопрос быстродействия расчета магнитного поля является одним из основных. Поэтому выбор оптимального варианта расчетной модели, из совокупности построенных, оказывается принципиальным при его численной реализации.

Выводы. Алгоритм решения задачи расчёта магнитных полей при помощи фиктивных магнитных зарядов представляется следующим образом:

- выбирается поле $\overline{H}_o$, которое удовлетворяет условию rot $\overline{H}_o = \overline{\delta}$;
- рассчитывается значение магнитных зарядов $\rho_m = -\, div\, \mu \overline{H}_o$;
- решается уравнение $div \mu grad U_M = -\, \rho_m$ для скалярного магнитного потенциала;
- определяется поле $\overline{H}_p$ как $\overline{H}_p = -\, grad U_M$ и затем искомое поле $\overline{H} = \overline{H}_o + \overline{H}_p$.

В результате электрические токи плотностью $\overline{\delta}$ заменяются магнитными зарядами с плотностями ρ_m, σ_m; уравнения для векторов поля заменяются уравнением для скалярной функции U_M, а вычисление искомого поля $\overline{H}$ связано со сложением полей $\overline{H}_p$ и $\overline{H}_o$.

Библиографический список

1. *Бинс К.* Анализ расчёта электрических и магнитных полей / К. Бинс, П.Лауренсон. – М.: Энергия, 1970. – 376 с.

2. *Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники / К.С. Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В.Коровкин, В.Л.Чечурин. – Т.2,3. – СПб.: Питер, 2003. – 377 с.

3. *Демирчян К.С.* Моделирование магнитных полей / К.С. Демирчян. – Л.: Энергия, 1974. – 288 с.

4. *Боронин В.Н. Винокуров М.Р.* Расчётные модели источников потенциального поля для обмоток МГД–генераторов: Изв. АН СССР // Энергетика и транспорт. – 1981. – №2. – С.98-105.

Материал поступил в редакцию 26.05.08.

D.J.PARSHIN, M.R.VINOKUROV

TRANSFORMATION OF A VORTICAL MAGNETIC FIELD TO A POTENTIAL FIELD OF SOURCES

In present article the design procedure and modeling of the stationary and almost stationary magnetic field, based on transformation of a vertical magnetic field to a potential of sources is stated. In result, electric currents are replaced with magnetic charges, and the equations for vectors of a field are replaced with the equation for scalar function.

ПАРШИН Дмитрий Яковлевич (р.1943), заведующий кафедрой «Электротехника и техническая кибернетика» РГАСХМ, профессор (2008),доктор технических наук (2007). Окончил Новочеркасский политехнический институт (1966).
Область научных интересов: автоматизация производства и робототехника.
Автор более 100 научных публикаций.

ВИНОКУРОВ Михаил Романович (р.1948), доцент кафедры «Электротехника и техническая кибернетика» РГАСХМ, кандидат технических наук (1982). Окончил Омский политехнический институт (1972).
Область научных интересов: теоретическая электротехника.
Автор 26 научных публикаций.

УДК 004.41

Н.С.МОГИЛЕВСКАЯ, В.Р.СКОРОБОГАТ, В.С.ЧУДАКОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕКОДЕРОВ КОДОВ РИДА-МАЛЛЕРА ВТОРОГО ПОРЯДКА

Представлены результаты сравнительных экспериментов по исследованию корректирующей способности двух вероятностных декодеров кодов Рида-Маллера (декодер Сидельникова-Першакова и декодер Лоидрю-Саккура). Для получения результатов экспериментов программно реализована имитационная модель цифрового канала передачи данных.

Ключевые слова: *коды Рида-Маллера, вероятностный декодер, экспериментальное исследование декодеров.*

Введение. В настоящее время одной из актуальных задач техники связи является построение новых алгоритмов декодирования известных помехоустойчивых кодов. Основной целью их построения является нахождение и исследование таких методов неперебoрного декодирования, которые по своим характеристикам были бы по возможности близкими по эффективности к переборным алгоритмам и при этом сохраняли бы приемлемое значение оценки сложности.

Сейчас активно разрабатываются новые декодеры и для давно известных и хорошо изученных кодов Рида-Маллера (код РМ). Напомним, что коды РМ являются простейшим примером класса геометрических кодов. Параметрами этих кодов является пара натуральных чисел m и r, r<m. Характеристики кода РМ: длина $n=2^m$; размерность $k = C_m^0 + C_m^1 + \ldots + C_m^r$, минимальное кодовое расстояние $d = 2^{m-r}$, количество гарантированно исправляемых ошибок $t = 2^{m-r-1} - 1$. Коды РМ с параметрами m,r далее будем обозначать РМ(r,m). В случае r=2 коды РМ принято называть кодами второго порядка. Сложность алгоритма декодирования полным перебором пропорциональна числу элементов кода и даже для кода РМ второго порядка имеет не полиномиальную функцию оценки сложности [1].

За последнее время предложен ряд новых декодеров кодов РМ. Так, в работах [2-6] предложены мягкие декодеры кодов РМ, особенность которых заключается в том, что алгоритм получает на вход, возможно, искаженное кодовое слово, координаты которого записаны вещественными числами. Эта особенность позволяет объединять такие алгоритмы в каналах связи с демодуляторами. Представленный в работе [2] алгоритм мягкого декодирования кодов Рида-Маллера имеет сложность порядка $n \ln n$ и позволяет исправлять большинство ошибок веса $\sqrt{n / \ln n}$. В работе [7] представлен списочный декодер, особенностью которого является то, что на выходе алгоритма вычисляется не одно кодовое слово, а список наиболее вероятных кодовых слов, при этом длина списка определяется параметрами алгоритма.

В работах [8-10] предложены вероятностные алгоритмы декодирования кодов РМ. Особенностью вероятностных алгоритмов является возможность с большой вероятностью корректировать кодовые слова, ошибки в которых превышают число t гарантированно исправляемых ошибок.

Постановка задачи. В данной работе необходимо провести сравнительное исследование мажоритарного декодера (МД) [1], вероятностного декодера Сидельникова-Першакова (СПД) [8] и модифицированного декодера Сидельникова-Першакова (МСПД) [10] кодов Рида-Маллера. Для проведения экспериментов необходимо программно реализовать указанные алгоритмы декодирования.

Далее рассмотрим особенности используемых алгоритмов декодирования и сведения об их программной реализации. Укажем условия проводимых экспериментов и их результаты.

Мажоритарный декодер кода Рида-Маллера. Был предложен Ридом в 50-х годах XX века. Алгоритм позволяет гарантированно исправлять все ошибки веса, не превышающего t. Отметим, что алгоритм декодирования Рида восстанавливает сразу информационное слово, не находя соответствующего ему верного кодового слова. Восстановление информационного слова ведется итерационно по r блокам порождающей матрицы кода РМ, начиная с нижнего. На каждой итерации восстанавливаются биты информационного слова, соответствующие текущему блоку с помощью вычисления специальным образом подобранных контрольных сумм и мажоритарного голосования.

Декодер Сидельникова-Першакова. В работе [8] авторами предложен вероятностный алгоритм декодирования кодов Рида-Маллера второго и третьего порядка при числе ошибок, превышающем значение t. СПД рассматривает проблему декодирования кодового слова РМ(2,m) кода как задачу декодирования n кодовых слов РМ(1,m) кода. Этот алгоритм параметризуется двумя целыми значениями s и h, где $s \in [1,..,n]$, $h \geq 0$, которые отвечают за глубину перебора при поиске верных значений на одном из этапов алгоритма. Согласно [8] этот алгоритм имеет сложность порядка $n^2(m+hs^3)$ и позволяет почти всегда исправлять ошибки веса $t \leq (n - Cm^{1/4}n^{3/4})/2$ при $m \to \infty, C > \ln 4$.

Модифицированный декодер Сидельникова-Першакова. Авторами работ [9, 10] предложена модификация СПД, которая, по мнению авторов, обеспечит декодирование большего числа ошибок по сравнению с оригинальным декодером из [8]. Кратко рассмотрим идею модификации СПД. Так, в алгоритме, разработанным Лоидрю и Саккуром, параметры s и h отсутствуют, и поиск ведется с фиксированным параметром s=1. Помимо этого в алгоритме отсутствуют действия, уточняющие значения и управляемые параметром h, но добавлено отсутствующее в СПД мажоритарное голосование, уточняющее элементы массива, содержащего данные о части информационного слова, стоящей при квадратичной составляющей кодирующей булевой функции [10]. Такое уточнение элементов массива происходит на третьем шаге алгоритма МСПД, далее при необходимости сослаться на этот шаг будем называть его «уточняющим шагом». Согласно [9], модифицированный алгоритм имеет сложность $n^2 \log(n)$ и позволяет исправлять $n/2(1-\varepsilon)$ ошибок, где ε превышает величину $n^{-1/3}$.

Программное средство. Все рассмотренные декодеры кодов РМ – МД, СПД, МСПД были программно реализованы на языке СИ++ в среде MS Visual Studio 2005 и Borland C++ Builder. Построенная программная реализация позволяет применять мажоритарный декодер к кодам РМ любого по-

рядка до десятого включительно. Для возможности исследования влияния уточняющего шага МСПД на работу алгоритма в программном средстве была реализована возможность не выполнять этот шаг, а при необходимости заменять его шагом-«заглушкой», сохраняющим массив уточняемых данных без изменений.

Для проведения экспериментов построена программная утилита, позволяющая накладывать на правильные кодовые слова вектора ошибок заданного веса. Моделируемые вектора ошибок считаются поступающими из стационарного двоичного симметричного канала без памяти и без стираний и действуют на кодовые слова аддитивно [11].

Методика проведения экспериментов. Схема проведения экспериментов аналогична схеме, предложенной в работе [8]. А именно, для кода РМ с фиксированными параметрами случайным образом генерируется некоторое информационное слово и вычисляется соответствующее ему правильное кодовое слово, на которое накладывается случайный вектор ошибок заданного веса. Искаженное кодовое слово поступает на вход алгоритма декодирования. Результат декодирования сравнивается с правильным информационным словом, если эти вектора совпадают, то выносится решение об успешном декодировании, иначе декодирование считается неверным. Для фиксированных параметров кода РМ и каждого алгоритма декодирования (в случае СПД и для каждой фиксированной пары параметров s и h) такие испытания проводились 1000 раз.

Результаты работы декодеров приведены в табл.1. Опишем структуру этой таблицы. В первом столбце находится параметр m исследуемого кода Рида-Маллера второго порядка (параметр r фиксируется, r=2), а также для удобства приведены параметры: n и k – длина и размерность кода, t – расчетное значение числа гарантированно исправляемых ошибок. Во втором столбце записан вес случайного вектора ошибок, накладываемого на правильное кодовое слово. Третий и пятый столбцы содержат процент правильно декодированных кодовых слов мажоритарным декодером и декодером Сидельникова-Першакова, соответственно. Параметры s и h, использованные в декодере Сидельникова-Першакова, указаны в четвертом столбце. Шестой и седьмой столбцы содержат результаты, полученные с применением модифицированного декодера Сидельникова-Першакова, при этом в шестом столбце указаны результаты работы декодера, описанного в [12, 13], а в седьмом столбце указаны результаты, полученные этим же декодером без использования его уточняющего шага.

Таблица 1

Результаты экспериментов по исследованию
эффективности декодеров кодов Рида-Маллера второго порядка

Параметры кода, m, n, k, t	$W_H(e)$	МД, %	s, h	СПД, %	МСПД, %	МСПД без уточняющего шага, %
1	2	3	4	5	6	7
5, 32, 16, 3	3	100	1, 3	100	100	100
	4	2,6	1, 3	23	20,7	19
	4		3, 1	28		
	5	0,7	1, 0	6,9	8,6	3,7
	5		1, 3	10,1		
	5		3, 1	10,3		

Окончание табл.1

1	2	3	4	5	6	7
6, 64, 22, 7	7	100	1, 3	100	100	100
	11	1,3	1, 3	64,6	62,8	48,6
	11		3, 1	68,1		
	11		3, 3	67,2		
	13	0	3, 1	5,4	9,7	0,1
	13		1, 3	4,7		
	13		3, 3	7		
7, 128, 29, 15	15	100	1, 3	100	100	100
	29	0	1, 3	52,2	48,1	3,1
	29		3, 1	61,3		
	29		3, 3	66,4		
	30	0	3, 1	29,1	32,3	0,4
	30		1, 3	38,7		
	30		3, 3	42,1		
8, 256, 37, 31	31	100	1, 3	100	100	100
	69	0	1, 3	67,8	77	14,2
	69		3, 1	75,4		
	69		3, 3	81,2		
	72	0	1, 3	10,1	56,2	1,7
	72		3, 1	21,3		
	72		3, 3	35,7		
	73	0	1, 3	3,2	41,6	0,8
	73		3, 1	8,3		
	73		3, 3	18,6		
9, 512, 46, 63	63	100	1, 3	100	100	100
	159	0	1, 3	52,2	96	9
	159		3, 1	80,6		
	159		3, 3	92,2		
	164	0	1, 3	1,4	76,2	0
	164		3, 1	10,4		
	164		3, 3	31,8		

Для оценки времени работы уточняющего шага алгоритма МСПД подсчитано количество арифметических операций и операций присвоения в конкретной программной реализации для значений m=7 и m=9.

Таблица 2

Сравнение количества арифметических операций и операций присвоения алгоритмов МСПД и МСПД без уточняющего шага

Параметры алгоритма	Количество арифмет. операций		Количество операций присвоения	
	m=7 (n=128)	**m=9 (n=512)**	**m=7 (n=128)**	**m=9 (n=512)**
Алг. МСПД	34 992 847	2 641 687 827	18 529 932	1 384 989 044
Алг. МСПД без уточняющего шага	34 750 912	2 636 726 528	18 287 996	1 380 027 744
Различие, %	0,69	0,19	1,31	0,36

Обсуждение результатов экспериментов

1. Анализ значений, приведенных в табл.1, показал, что мажоритарный декодер, как и ожидалось, полностью исправляет все ошибки в кодовых словах, в случае, если количество ошибок не превышает числа гарантированно исправляемых ошибок t; при числе ошибок, превышающем

значение t, мажоритарный декодер практически не исправляет ошибки. Вероятностные алгоритмы также показали стопроцентное исправление ошибок при числе ошибок, не превышающем t, однако при увеличении значения t не происходит такого лавинообразного уменьшения правильно декодированных слов, как при мажоритарном декодировании.

2. Результаты работы программной реализации алгоритма Сидельникова-Першакова совпадают с результатами, представленными его авторами в работе [8], что подтверждает корректность работы, построенной программной реализации.

3. При увеличении значений параметров s и h СПД происходит увеличение числа правильно декодированных слов. Эксперименты показали, что наиболее значимым является параметр s. Отметим также, что увеличение параметра h приводит к значительному возрастанию времени работы программы.

4. При параметрах s=1 и h=0 время работы алгоритма СПД практически совпадает со временем работы алгоритма МСПД. При увеличении значений s и h алгоритм СПД работает медленнее алгоритма МСПД.

5. Алгоритм МСПД без применения уточняющего шага показывает результаты схожие с результатами алгоритма СПД с параметрами s=1 и h=0. Применение уточняющего шага алгоритма МСПД существенно увеличивает вероятность правильного декодирования кодового слова. При этом, согласно табл. 2, влияние уточняющего шага на время работы приложения практически не значимо.

6. Выгода от использования МСПД возрастает с увеличением значения m. С увеличением параметров s и h алгоритма СПД эффективность декодирования увеличивается, но при этом не превосходит некоторого порогового значения, так, например, при m>8 даже со значениями параметров s и h, приближающимися к значению 10, СПД обладает меньшей корректирующей способностью по сравнению с алгоритмом МСПД.

7. Более детальный анализ результатов проведенных экспериментов показал, что исследуемые алгоритмы практически не чувствительны к местоположению ошибок внутри кодового слова.

Выводы. Реализованные алгоритмы СПД и МСПД позволяют эффективно восстанавливать кодовые слова, искаженные ошибками, число которых превышает t. Как показали эксперименты, выбор одного из этих декодеров должен определяться задачами, возникающими на практике. А именно, алгоритм СПД позволяет гибко варьировать эффективность декодирования с помощью параметров s и h, при этом существенно меняя время работы алгоритма. Алгоритм МСПД в случаях при m>7 позволяет корректировать большее число ошибки, по сравнению с алгоритмом СПД.

В рассмотренных вероятностных алгоритмах декодирования кодов РМ присутствовали шаги, на которых необходимо случайным образом выбрать одно значение из некоторого множества, при этом выбор того или иного значения влияет на результат декодирования. Если в таких ситуациях выбирать не одно значение из множества равных, а запоминать и использовать в процессе декодирования их все, то на выходе алгоритма декодирования будет создан список кодовых слов. С учетом этой особенности в дальнейшем нами планируется модификация алгоритма МСПД на случай списочного декодирования.

Библиографический список

1. *Мак-Вильямс Дж.* Теория кодов, исправляющих ошибки / Дж.Мак-Вильямс, Дж.Слоен. – М.: Связь, 1979. – 744 с.
2. *Dumer I.* Soft-decision decoding of Reed-Muller codes: A simplified algorithm, IEEE transactions on information theory, vol. 52, no. 3, March 2006. – Pp. 954-963.
3. *Solte N., Sorger U.* Soft-decision stack decoding of binary Reed-Muller codes with "Look-ahead" technique. 7th International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding Theory, pp. 293-298, Bansko, Bulgaria, 18-24 June 2000.
4. *Ashikhmin A., Litsyn S.* Simple MAP decoding of first-order Reed-Muller and Hamming codes, IEEE transactions on information theory, vol. 50, no. 8. –August 2004. – Pp. 1812-1818.
5. *Schnabl G., Bossert M.* Soft-Decision decoding of Reed-Muller codes as generalized multiple concatenated codes, IEEE transactions on information theory, vol.41, no. 1. – January 1995. – Pp. 304-308.
6. *Lucas R., Bossert M., Dammann A.* Improved soft-decision decoding of Reed-Muller codes as generalized multiple concatenated codes, Proc. ITG Conf. source and channel coding, Aahen. - Germany, 1998. – Pp. 137-141.
7. *Dumer I., Shabunov K.* Soft-decision decoding of Reed-Muller codes: Recursive lists, IEEE Transactions on information theory, vol. 52, no. 3, March 2006. – Pp. 1260-1266.
8. *Сидельников В.М., Першаков А.С.* Декодирование кодов Рида-Маллера при большом числе ошибок // Пробл. передачи информ. – 1992. – Т.28. - №3. - С.80-94.
9. *Loidreau P., Sakkour B.* Modified version of Sidel'nikov-Pershakov decoding algorithm for binary second order Reed-Muller codes. Ninth International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding theory, ACCT-9. – P.266-271, Kranevo, 2004.
10. *Sakkour B.* Decoding of second order Reed-Muller codes with a large number of errors. ITW2005 - IEEE ITSOC Information Theory Workshop 2005 on Coding and Complexity, Rotoua, New Zealand, 2005.
11. *Деундяк В.М.* Математическое моделирование источников ошибок цифровых каналов передачи данных: учеб. пособие / В.М.Деундяк, Н.С.Могилевская. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006.

Материал поступил в редакцию 21.05.08.

N.S. MOGILEVSKAYA, V.R. SKOROBOGAT, V.S. CHUDAKOV

EXPERIMENTAL RESEARCH OF SECOND ORDER REED-MULLER CODES

In this paper given results of comparative experiments on research of correcting ability of two Reed-Muller codes likelihood decoders (Sidel'nikov-Pershakov decoder and Loidreau-Sakkour decoder) are presented. For reception of experimental results the program imitating model of the digital data link is realized.

МОГИЛЕВСКАЯ Надежда Сергеевна, доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» ДГТУ, кандидат технических наук. Окончила ДГТУ (2000).
Научные интересы: изучение корректирующих способностей помехоустойчивых кодов по отношению к ошибкам различных типов; моделирование источников ошибок цифровых q-ичных каналов связи.
Автор 30 публикаций.

СКОРОБОГАТ Владимир Романович, (р.1982), аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» ДГТУ. Окончил ДГТУ (2004) по специальности «Компьютерная безопасность».
Научные интересы: криптографические методы защиты информации; изучение криптоаналитических алгоритмов атак на шифросистемы; применение теории помехоустойчивого кодирования к криптографии.
Автор 7 научных работ.

ЧУДАКОВ Виктор Сергеевич (р.1986). Окончил Донской государственный технический университет по специальности «Компьютерная безопасность».
Научные интересы: помехоустойчивое кодирование, разработка и реализация кодеров/декодеров кода Рида-Маллера различных порядков.
Автор одной научной работы.

УДК 534.2: 534.3: 534.4

М.А.СУМБАТЯН, С. Е.ШЕВЦОВ

АЛГОРИТМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ АУДИОФАЙЛОВ И ИХ РАСПОЗНАВАНИЕ НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТИВНЫХ КРИТЕРИЕВ

Разрабатываются алгоритмы цифровой обработки акустических сигналов, характерных для аудиофрагментов, записанных в виде wav-файлов. Вводится понятие автокорреляционной функции для таких сигналов, а также указываются некоторые объективные параметры, характеризующие сигналы такого типа. Исследуются некоторые практические аспекты в приложении к возможной классификации различных аудиофрагментов.

Ключевые слова: *Цифровая обработка, акустические сигналы, автокорреляционная функция.*

Введение. Стандартные файлы, содержащие аудиофрагменты, обладают рядом специфических особенностей. С одной стороны, они содержат информацию об акустических сигналах, записанных через микрофон, и, следовательно, задача обработки таких сигналов может быть решена классическими методами цифровой обработки [1]. С другой стороны, специфика данных акустических сигналов, связанных со звучанием фрагментов, рассчитанных на восприятие слушателем, отличает их, например, от сигналов акустической эмиссии или каких-либо подобных акустических сигналов, имеющих совершенно иную физическую природу [2].

В связи с этим обработка исследуемых аудиосигналов должна основываться на особых принципах, пригодных для сигналов, предназначенных для прослушивания. В данной работе предлагается использовать оценку поведения автокорреляционной функции (АКФ). Оказывается, что некоторые стохастические параметры поведения этой функции напрямую связаны с типом аудиофрагментов, записанных в виде акустических сигналов в рассматриваемых wav-файлах.

Фильтрация по октавным полосам. Пусть в стандартном wav-файле записан некий аудиофрагмент. Информация о нем содержится в файле в виде некоторого акустического сигнала $p(t)$, характеризующего амплитудно-временную зависимость акустического давления от времени. Современный PCM стандарт подразумевает в общем случае 16-битовую стереозапись с частотой дискретизации 44100 Гц. Это означает, что на самом деле записанный сигнал имеет два канала, в каждом из них – с записью в дискретном виде:

$$p_j = p(t_j),\ t_j = jh_t,\ h_t = 1/44100\ сек.,\ j = 0,\ldots,N-1,\ \ N h_t = T. \qquad (1)$$

В случае стереосигнала функция вида (1) должна рассматриваться для левого и правого акустического каналов отдельно. PCM стандарт допускает запись также и в монорежиме. В этом случае имеем одну функцию вида (1). 16-битовая запись предполагает, что один бит для значений функции p_j отводится под знак, а оставшиеся 15 бит выделяются под значения модуля самой величины в дискретизации данных от 1 до

$2^{15} = 32768.$ Таким образом, относительная погрешность в дискретном задании функции равна $1/32768 = 0.003\%$, что следует признать довольно точным приближением для непрерывной функции даже со значительными градиентами.

В классической акустике [3] общепринятым является обработка сигналов в каждой из шести основных октавных полос, в которых частоты колебания выражены в герцах:

$$f^{(1)} = 125,\ f^{(2)} = 250,\ f^{(3)} = 500,\ f^{(4)} = 1000,\ f^{(5)} = 2000,\ f^{(6)} = 4000\ . \qquad (2)$$

При этом нижняя и верхняя границы каждой октавной полосы (соответственно частоты $f_1^{(n)}, f_2^{(n)}$) выражены через несущую частоту соответствующей октавы

$$f_1^{(n)} = f^{(n)}/\sqrt{2}, \qquad f_2^{(n)} = f^{(n)}\sqrt{2}, \qquad (n = 1,...,6), \qquad (3)$$

покрывая непрерывным образом частотную область от $125/\sqrt{2} = 88\,Гц$ до $4000\sqrt{2} = 5657\,Гц$.

Первая часть вычислений, применяемая к записанному сигналу для оценки его октавных компонент на частотных интервалах $(f_1^{(n)}, f_2^{(n)}), (n = 1,...,6)$, является достаточно стандартной и основывается на теории цифровых фильтров [4]. Данный метод в применении к произвольному сигналу $p(t)$ при переходе в частотную область состоит в отсечении вкладов от всех частот вне интервала $(f_1, f_2),$ на котором происходит фильтрация. Введем пробную функцию $g(t),$ преобразование Фурье которой равно нулю: $G(f) = 0$ для всех частот вне интервала (f_1, f_2) и равно единице: $G(f) = 1$ для $f \in (f_1, f_2)$. Поскольку каждая частотная компонента f дает вклад в осцилляции на рассматриваемой частоте как со значением f, так и $-f$, то $(\omega = 2\pi f)$

$$g(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} G(f)\,e^{-i\omega t}\,d\omega = \frac{1}{2\pi}\int_{f_1<|f|<f_2} G(f)\,e^{-i\omega t}\,d\omega =$$
$$= \frac{1}{2\pi}\int_{f_1<|f|<f_2} e^{-i\omega t}\,d\omega = \frac{1}{\pi}\frac{\sin(\omega_2 t) - \sin(\omega_1 t)}{t} = \frac{\sin(2\pi f_2 t) - \sin(2\pi f_1 t)}{\pi t}\ . \qquad (4)$$

Тогда, согласно теореме о свертке, сигнал, отфильтрованный на частотном отрезке (f_1, f_2), может быть представлен в континуальном и дискретном виде:

$$p^*(t) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau)g(t-\tau)\,d\tau\ , \qquad p^*(t) = h_t\sum_{j=0}^{N-1} p(t_j)g(t-t_j). \qquad (5)$$

Такой прямолинейный подход обладает одним дефектом, известным в литературе как «эффект Гиббса» [5]. Он обычно наблюдается при применении дискретного аналога преобразования Фурье (ДПФ) вместо его исходной континуальной формы и состоит в том, что для непериодических сигналов ДПФ, как правило, генерирует небольшой сильно осциллирующий «хвост» на концах рассматриваемого временного интервала. Для устранения этих фиктивных осцилляций можно применять те или иные «времен-

ные окна», или взвешивание. В нашем алгоритме мы используем окна Хэмминга [5].

Заметим, что такой расчет, осуществленный прямо во временной области, требует квадратичного числа арифметических операций по числу выбранных временных узлов, поскольку в формуле (5) для каждого момента $t = t_m$ необходимо осуществить суммирование по j. Для существенного сокращения времени вычислений необходимо перейти в спектральную область, воспользовавшись теоремой свертки:

$$\tilde{p}^*(\omega) = \tilde{p}(\omega) G(\omega). \qquad (6)$$

Такой подход, с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) в дискретном виде является линейно-логарифмическим, т.е. линейным по числу узлов. Далее, Фурье-обращение формулы (6) – опять-таки линейно-логарифмическим. Однако на пути применения БПФ существует один существенный момент, преодоление которого требует определенного навыка. Дело в том, что по своей сути выражение (5) является вещественным, однако, переход в частотную область (6), без предварительной обработки, приводит к оперированию с комплекснозначными выражениями. Тогда и полученный результат будет комплекснозначным. Для преодоления указанной трудности запишем обращение Фурье выражения (6):

$$p^*(t) = \frac{1}{2\pi}\int_0^\infty \left[\tilde{p}_{re}(\omega) + i\tilde{p}_{im}(\omega)\right] G(\omega) e^{-i\omega t} d\omega +$$

$$+\frac{1}{2\pi}\int_0^\infty \left[\tilde{p}_{re}(\omega) - i\tilde{p}_{im}(\omega)\right] G(\omega) e^{i\omega t} d\omega = \frac{1}{\pi}\mathrm{Re}\left[\int_0^\infty \tilde{p}(\omega) G(\omega) e^{-i\omega t} d\omega\right], \qquad (7)$$

где мы учли, что функция $G(\omega)$ по своему определению вещественна; для вещественной функции $p(t)$ реальная часть ее Фурье образа – функция $\tilde{p}_{re}(\omega)$ четная по ω, а мнимая часть $\tilde{p}_{im}(\omega)$ нечетная по ω. Кроме того, функция $G(\omega)$ четная. Таким образом, искомый результат получается взятием вещественной части от обратного преобразования Фурье в положительной частотной области.

Переход в частотную область часто также сопровождается учетом реальной чувствительности слуховых каналов, которая является не постоянной по частоте. Максимум чувствительности находится примерно в области 2000 - 2500 Гц и по традиции описывается А-взвешенной частотной зависимостью [3]. Проведенные авторами исследования показали, что с достаточно высокой точностью данная функция может быть приближена выражением для энергетической характеристики, связанной с квадратом акустического давления:

$$A^2(\omega) = 10^{y/10}, \quad y = 2 - 50\left[\frac{\lg(f/2200)}{\lg(20/2200)}\right]^2. \qquad (8)$$

Характерные точки, через которые проходит график данной функции: $A(20) = -48\,dB,\ A(200) = -11\,dB,\ A(2200) = 2\,dB,\ A(10000) = -3\,dB.$

Таким образом, вместо функции фильтрации $G(\omega)$ в частотной области на практике следует использовать произведение функций $G(\omega)$ и $A(\omega)$.

Автокорреляционная функция сигнала. После того как исходный аудиосигнал разложен на 6 основных октавных полос, а также учтена чувствительность слуховых каналов (8), в каждой из этих полос происходит независимая цифровая обработка. Исследования Андо [6], выполненные им для всего сигнала в целом, без разложения на частотные интервалы, показали, что вид аудиофрагмента напрямую связан с АКФ записанного сигнала $p(t)$. Данная функция была предложена для описания поведения стационарных процессов [1] и имеет вид

$$\varphi_p(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T p(t)\, p(t+\tau)\, dt\,. \qquad (9)$$

Оказывается, что для эргодических стационарных процессов АКФ убывает с ростом τ: $\lim\limits_{\tau\to\infty} \varphi_p(\tau) = 0$. Андо [6] показал, что характерная скорость спадания модуля этой функции с ростом аргумента τ однозначно характеризует тип записанного аудиофрагмента. В частности, решающим является значение основного параметра τ_e, определяющего время спадания функции $\varphi_p(\tau)$ на 10 дБ. Исследования авторов показали, что эту идею Андо можно усилить, перенеся вычисление параметра τ_e на различные частотные области, т.е. применяя в (9) вместо функции $p(t)$ функцию $p^*(t)$. Прикладные аспекты будут описаны в следующем пункте. Здесь же опишем алгоритм эффективного вычисления АКФ. Как и в проведении фильтрации по формуле (5), нахождение АКФ-функции, согласно ее определению (9) требует квадратичного числа арифметических операций. Для возможности использования БПФ следует воспользоваться теоремой Винера-Хинчина [1], выражающей АКФ в виде обратного преобразования Фурье от спектральной плотности мощности $\Phi(\omega)$:

$$\varphi_p(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega) e^{-i\omega\tau}\, d\omega, \quad \Phi(\omega) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \left| \int_0^T p(t) e^{i\omega t}\, dt \right|^2. \qquad (10)$$

Ясно, что обе интегральные операции в (10) в их дискретной реализации допускают применение БПФ, т.е. такой подход требует линейно-логарифмического числа арифметических операций.

Дискретная реализация описанного алгоритма основана на интерполяционной формуле для интеграла Фурье в (10):

$$\int_0^T p(t) e^{i\omega t} dt \Big|_{\omega=\omega_k} \approx h_t \sum_{j=0}^{N-1} p_j e^{i\omega_k t_j} = h_t \sum_{j=0}^{N-1} p_j e^{2\pi i k j h_t h_f} = h_t \sum_{j=0}^{N-1} p_j e^{2\pi i k j h_f T/N} =$$
$$= h_t \sum_{j=0}^{N-1} p_j e^{2\pi i k j/N},\ h_f = 1/T = 1/(N h_t),\ \omega_k = 2\pi k h_f,\ \Omega = \omega_{\max} = N h_f. \qquad (11)$$

В такой интерпретации соотношения (10) допускают прямое применение БПФ. При этом сама АКФ определяется на основе обратного ДПФ:

$$\varphi_p(t_j) = \frac{1}{\pi}\mathrm{Re}\left[\int_0^{\Omega}\Phi(\omega)e^{-i\omega t}d\omega\right] \approx$$
$$\approx \frac{2\pi h_f}{\pi}\mathrm{Re}\left[\sum_{k=0}^{N-1}\Phi(\omega_k)e^{-i\omega_k t_j}\right] = 2h_f\,\mathrm{Re}\left[\sum_{k=0}^{N-1}\Phi(\omega_k)e^{-2\pi i k j/N}\right], \quad (12)$$

поскольку $\Phi(\omega)$ - четная вещественная функция. При таком подходе выражение (12) также допускает прямое применение БПФ.

Роль параметра τ_e в ряду объективных акустических параметров. Как было сказано выше, параметр τ_e характеризует эффективный срок нормализованной АКФ, определяемый по промежутку времени, на котором АКФ спадает на 10 дБ. Значение этого параметра для оценки типа аудиофрагмента и качества звучания исследовалось на сигналах записанных фрагментов четырнадцати произведений, исполненных разными составами. Первоначально для определения оптимального значения τ_e в трёх частотных полосах были исследованы диапазоны инструментов, относящихся к трём основным регистрам в музыке и звукотехнике. Так, у контрабаса предел в верхнем диапазоне - это «ля» первой октавы (440 Гц). Однако необходимо было определить его наиболее часто используемый диапазон игры. Для этого был разобран ряд партитур из списка хрестоматийных произведений. Выявлено, что частота раздела между нижней и средней полосой находится в пределах 260-280 Гц, а между средней и верхней – 1200-1300 Гц. Поэтому для дальнейшего исследования авторам пришлось отказаться от двух общепринятых подходов. С одной стороны, Андо [6] оперировал этим параметром для всего сигнала в целом, без разделения на различные частотные диапазоны. С другой стороны, традиционное разделение на октавные полосы, в силу сказанного выше, также неприемлемо для наших экспериментов. В связи с этим для оценки параметра авторами предлагается разделение на три частотные полосы τ_e: низко-, средне-, и высокочастотную, с границами разделения 261 и 1244Гц. В нашем алгоритме с предварительным использованием соответствующих фильтров была проведена работа по нахождению параметра τ_e как в трёх частотных полосах (с соответствующим присвоением символов – hi, mid, low), так и без фильтрации, используя сэмплированные фрагменты. В таблице представлены данные минимальных значений параметра, поскольку именно они представляют интерес, обусловленный большей вероятностью возникновения эффекта – «эхо» в концертном зале в этом диапазоне значений. Выбирались характерные фрагменты музыкальных сигналов (смена темпа, характера, фактуры, вступление других инструментов).

Сигналы музыкальных произведений и их протяжённость в секундах	Исходный импульс τ_e, мс	Высокие частоты τ_e,мс	Средние частоты τ_e, мс	Низкие частоты τ_e, мс
1	2	3	4	5
1. 99	40/41	20/20	54/61	109/113
2. 100	18/27	12/18	28/36	72/54
3. 30	30/29	28/21	51/52	91/93
4. 66	20/32	13/13	43/46	92/85
5. 51	33/40	20/20	40/50	226/123

Окончание табл.

1	2	3	4	5
6. 29	40/40	32/32	40/40	111/97
7. 29	22/30	15/18	34/34	61/68
8. 50	35/32	60/63	140/132	220/215
9. 63	34/25	13/13	34/30	117/118
10. 44	167/139	46/151	167/157	153/123
11. 30	46/46	11/11	91/55	147/183
12. 29	51/51	24/24	51/86	173/194
13. 45	19/19	9/12	37/38	45/136
14. 28	18/18	9/9	34/34	85/85

Примечание: 2,3,4,6,7,9,11,13 - симфонический оркестр - большой состав;
12 - ансамбль русских народных инструментов (2балалайки, 2 домры, баян)
1,8,10,14 - камерный симфонический оркестр, 11- + ксилофон
5 – хор

Результаты эксперимента показали, что значения τ_e в 74% случаев больше, чем у τ_e, Вч (72 из 92). Параметр τ_e в 24% случаев равен τ_e, Сч, в 6% больше τ_e, Сч, и в 69% меньше τ_e, Сч, и τ_e лишь в 4% случаев равен τ_e, Нч, в 5% больше и 91% меньше τ_e, Нч. Таким образом видно, что значения параметра τ_e (мс) сильно отличаются от его частотно-ограниченных аналогов, в связи с чем вызывает сомнение корректность использования этого параметра.

Более подробный анализ по трем выбранным частотным диапазонам приводит нас к выводу, что общее свойство музыкальных сигналов заключается в их скоротечности в высокочастотном диапазоне. Ясно также, что низкочастотный диапазон отличается большей продолжительностью.

При формировании обрабатываемых wav-файлов использовалась следующая методика. Записи музыкальных коллективов на цифровой носитель производились с помощью микрофонной стереопары (Brul&Kjaer) в относительно заглушенном помещении. Место установки стереопары – 1,5м от края посадки оркестра, ансамбля или хора, высота стойки – два метра. Записывали все произведения целиком, затем сэмплировали временные фрагменты длительностью $20 сек \le T \le 2 мин$ из разных частей произведений в соответствии со сменой темпа и характера исполнения. Сэмплирование происходило с помощью звуковой станции PRO TOOLS v 6.7 и программы Spectralab v 40.32.08. Два сигнала не складывались в один, поскольку и левый, и правый канал содержал индивидуальную информацию согласно посадке исполнителей.

Выводы. С помощью алгоритмов цифровой обработки акустических сигналов аудиофайлов произведено их распознавание на основе объективного параметра τ_e, характеризующего временную природу случайности процесса возникновения сигнала в музыкальных произведениях. Проанализированы рабочие диапазоны игры различных инструментальных групп по всей частотной шкале и выявлены три основных полосы. Параметр τ_e исследуется как в данных полосах при помощи фильтрации, так и без частотного ограничения. Проведён сравнительный анализ полученных значений. Найдена закономерность, указывающая на скоротечность сигналов в высокочастотном диапазоне.

Библиографический список

1. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. - СПб.: Питер, 2002.
2. *Kuttruff K.H.* Auralization of impulse responses modeled on the basis of Ray-Tracing results // J. Audio Eng. Soc.- 1993. - 41 - P. 876-880.
3. *Pierce A.D.* Acoustics. ASA: New York, 1991.
4. *Блейхут Р.* Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / Р. Блейхут. - М.: Мир, 1989.
5. *Солонина А.И.* и др. Основы цифровой обработки сигналов (2-е изд.)./ А.И. Солонина и др. - СПб.: БХВ - Петербург, 2005.
6. *Ando Y.* Architectural Acoustics / Blending sound sources, sound fields, and listeners. Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.

Материал поступил в редакцию 30.06.08.

M. A. SUMBATYAN, S. YE. SHEVTSOV

THE ALGORITHM OF DIGITAL PROCESSING FOR ACOUSTIC SIGNALS OF AUDIO FILES AND THEIR RECOGNITION THE BASIS OF SOME OBJECTIVE CRITERIA

There are proposed some algorithms of digital signal processing specific for audio pieces recorded in the form of wav-files. A concept of auto correlation function is introduced, and there are indicated some objective parameters which characterizing the signals of such a type. Some practical aspects of possible aspects of possible classification of various audio pieces are studied.

СУМБАТЯН Межлум Альбертович (р. 1954), заведующий отделом ультразвука НИИМ и ПМ РГУ, профессор кафедры теоретической гидроаэромеханики механико-математического факультета ЮФУ (1999), доктор физико-математических наук (1995). Окончил механико-математический факультет РГУ (1976).
Область научных интересов: акустические методы контроля, исследование фундаментальных вопросов аэродинамики и аэроакустики.
Имеет более 160 опубликованных научных работ.

ШЕВЦОВ Станислав Евгеньевич (р. 1976), главный специалист концертно-театрального центра «Югра-Классик» (г.Ханты-Мансийск). Окончил Екатеринбургскую консерваторию по классу «Звукорежиссура» (1999), а также заочную аспирантуру Санкт-Петербургского университета кино и телевидения по специальности «Акустика» (2003).
Область научных интересов – архитектурная акустика.
Имеет 6 опубликованных научных работ.

УДК 681.51

О.И. АТРОЩЕНКО

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЙ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается применение метода АКАР (Аналитическое конструирование агрегированных регуляторов по заданным инвариантным многообразиям) синергетической теории управления для синтеза законов управления нелинейными распределенными объектами управления. Объектом управления выбран водоносный горизонт центрального участка Кисловодского месторождения минеральных вод.
Ключевые слова: *коэффициент фильтрации, граничные условия, математическая модель, водоносный горизонт, фазовое пространство, инвариантное многообразие, переходной процесс, управляющее воздействие, фазовый процесс.*

Введение. Водоносный горизонт – это объект с распределенными параметрами, поведение такого объекта существенно зависит не только от времени, но и от пространственных координат [2, 4]. На центральном участке Кисловодского месторождения расположены пять эксплуатационных и пять контрольных скважин; эксплуатируется Валанжинский водоносный горизонт [2].

Постановка задачи. Имеется математическая модель системы управления, необходимо определить законы управления методом АКАР, обеспечивающим минимальное истощение эксплуатационных запасов подземных вод, т.е. снижение уровня водоносного горизонта [2].

Методы испытаний. Нелинейная математическая модель системы управления в переменных состояния имеет вид [2]:

$$\dot{x}_1 = -k_1 d_1 x_1 + k_2 d_1 x_2 - k_1 d_2 x_1 + k_6 d_2 x_6 - k_1 d_3 x_1 + k_{11} d_3 x_{11} - (F_0 - \sin(x_1))\frac{x_2 - x_1}{\Delta x};$$

$$\dot{x}_2 = k_1 d_1 x_1 - 2k_2 d_1 x_2 + k_3 d_1 x_3 - k_2 d_2 x_2 + k_7 d_2 x_7 - k_2 d_3 x_2 + k_{12} d_3 x_{12} - -(F_0 - \sin(x_2))\frac{x_3 - x_2}{\Delta x};$$

$$\dot{x}_3 = k_2 d_1 x_2 - 2k_3 d_1 x_3 + k_4 d_1 x_4 - k_3 d_2 x_3 + k_8 d_2 x_8 - k_3 d_3 x_3 + k_{13} d_3 x_{13} - -(F_0 - \sin(x_3))\frac{x_4 - x_3}{\Delta x};$$

$$\dot{x}_4 = k_3 d_1 x_3 - 2k_4 d_1 x_4 + k_5 d_1 x_5 - k_4 d_2 x_4 + k_9 d_2 x_9 - k_4 d_3 x_4 + k_{14} d_3 x_{14} - -(F_0 - \sin(x_4))\frac{x_5 - x_4}{\Delta x};$$

$$\dot{x}_5 = k_4 d_1 x_4 - k_5 d_1 x_5 - k_5 d_2 x_5 + k_{10} d_2 x_{10} - k_5 d_3 x_5 + k_{15} d_3 x_{15};$$

$$\dot{x}_6 = -k_6 d_1 x_6 + k_7 d_1 x_7 + k_1 d_2 x_1 - 2k_6 d_2 x_6 - k_6 d_3 x_6 + k_{16} d_3 x_{16} - (F_0 - \sin(x_6))\frac{x_7 - x_6}{\Delta x};$$

$$\dot{x}_7 = k_6 d_1 x_6 - 2k_7 d_1 x_7 + k_8 d_1 x_8 + k_2 d_2 x_2 - 2k_7 d_2 x_7 - k_7 d_3 x_7 + k_{17} d_3 x_{17} - -(F_0 - \sin(x_7))\frac{x_8 - x_7}{\Delta x};$$

$$\dot{x}_8 = k_7 d_1 x_7 - 2k_8 d_1 x_8 + k_9 d_1 x_9 + k_3 d_2 x_3 - 2k_8 d_2 x_8 - k_8 d_3 x_8 + k_{18} d_3 x_{18} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_8))\frac{x_9 - x_8}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_9 = k_8 d_1 x_8 - 2k_9 d_1 x_9 + k_{10} d_1 x_{10} + k_4 d_2 x_4 - 2k_9 d_2 x_9 - k_9 d_3 x_9 + k_{19} d_3 x_{19} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_9))\frac{x_{10} - x_9}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{10} = k_9 d_1 x_9 - k_{10} d_1 x_{10} + k_5 d_2 x_5 - 2k_{10} d_2 x_{10} - k_{10} d_3 x_{10} + k_{20} d_3 x_{20}; \quad (1)$$
$$\dot{x}_{11} = -k_{11} d_1 x_{11} + k_{12} d_1 x_{12} - k_{11} d_2 x_{11} + k_{16} d_2 x_{16} + k_1 d_3 x_1 - k_{11} d_3 x_{11} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{11}))\frac{x_{12} - x_{11}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{12} = k_{11} d_1 x_{11} - 2k_{12} d_1 x_{12} + k_{13} d_1 x_{13} - k_{12} d_2 x_{12} + k_{17} d_2 x_{17} + k_2 d_3 x_2 - k_{12} d_3 x_{12} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{12}))\frac{x_{13} - x_{12}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{13} = k_{12} d_1 x_{12} - 2k_{13} d_1 x_{13} + k_{14} d_1 x_{14} - k_{13} d_2 x_{13} + k_{18} d_2 x_{18} + k_3 d_3 x_3 - k_{13} d_3 x_{13} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{13}))\frac{x_{14} - x_{13}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{14} = k_{13} d_1 x_{13} - 2k_{14} d_1 x_{14} + k_{15} d_1 x_{15} - k_{14} d_2 x_{14} + k_{19} d_2 x_{19} + k_4 d_3 x_4 - k_{14} d_3 x_{14} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{14}))\frac{x_{15} - x_{14}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{15} = k_{14} d_1 x_{14} - k_{15} d_1 x_{15} - k_{15} d_2 x_{15} + k_{20} d_2 x_{20} + k_5 d_3 x_5 - k_{15} d_3 x_{15};$$
$$\dot{x}_{16} = -k_{16} d_1 x_{16} + k_{17} d_1 x_{17} + k_{11} d_2 x_{11} - 2k_{16} d_2 x_{16} + k_6 d_3 x_6 - k_{16} d_3 x_{16} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{16}))\frac{x_{17} - x_{16}}{\Delta x} - u_1;$$
$$\dot{x}_{17} = -k_{16} d_1 x_{16} - 2k_{17} d_1 x_{17} + k_{18} d_2 x_{18} + k_{12} d_2 x_{12} - 2k_{17} d_2 x_{17} + k_7 d_3 x_7 - k_{17} d_3 x_{17} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{17}))\frac{x_{18} - x_{17}}{\Delta x} - u_2;$$
$$\dot{x}_{18} = k_{17} d_1 x_{17} - 2k_{18} d_1 x_{18} + k_{19} d_1 x_{19} + k_{13} d_2 x_{13} - 2k_{18} d_2 x_{18} + k_8 d_3 x_8 - k_{18} d_3 x_{18} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{18}))\frac{x_{19} - x_{18}}{\Delta x} - u_3;$$
$$\dot{x}_{19} = k_{18} d_1 x_{18} - 2k_{19} d_1 x_{19} + k_{20} d_1 x_{20} + k_{14} d_2 x_{14} - 2k_{19} d_2 x_{19} + k_9 d_3 x_9 - k_{19} d_3 x_{19} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{19}))\frac{x_{20} - x_{19}}{\Delta x} - u_4;$$
$$\dot{x}_{20} = k_{19} d_1 x_{19} - k_{20} d_1 x_{20} + k_{15} d_2 x_{15} - 2k_{20} d_2 x_{20} + k_{10} d_3 x_{10} - k_{20} d_3 x_{20} - u_5.$$

Система (1) является многомерной, нелинейной, многосвязной пространственно-неинвариантной моделью, имеющей пять каналов управления. Коэффициенты фильтрации $k_1 - k_{20}$ зависят от пространственных координат, скорость движения водоносного горизонта $F = F_0 - \sin(x_i)$ является нелинейной величиной, $F_0 = 1.5$ м/сут.

В систему (1) входят следующие параметры и коэффициенты: $x_1 - x_{20}$ – переменные состояния, физический смысл которых – понижение уровня водоносного горизонта в точках дискретизации распределенного объекта управления. Состояния $x_1 - x_5$ определяют понижение уровня водоносного горизонта в контрольных скважинах, а состояния $x_{15} - x_{20}$ озна-

чают понижение уровня водосного горизонта в точках расположения эксплуатационных скважин; $u_1 - u_5$ – водозабор (дебит) из эксплуатационных скважин, физический смысл которого – управляющее воздействие на объект управления; η – коэффициент упругоемкости коллектора в 1/м. $d_1 = \frac{1}{\eta \Delta x^2}$, $d_2 = \frac{1}{\eta \Delta y^2}$, $d_3 = \frac{1}{\eta \Delta z^2}$; Δx, Δy, Δz – шаги дискретизации по осям x, y, z.

Согласно методу АКАР, необходимо синтезировать законы управления u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 как функцию координат состояния объекта $u(x)$, обеспечивающие минимальное понижение уровня в контрольных скважинах на один метр [2, 5]:

$$x_1 = x_1^0 = -1,\ x_2 = x_2^0 = -1,\ x_3 = x_3^0 = -1,\ x_4 = x_4^0 = -1,\ x_5 = x_5^0 = -1. \qquad (2)$$

В соответствии с числом независимых каналов управления может быть назначено пять инвариантов (стабилизация понижения уровня в точках расположения контрольных скважин x_1, x_2, x_3, x_4, x_5). Исходя из поставленной задачи (2), целесообразно выбрать параллельную совокупность внешних инвариантных многообразий:

$$\psi_m(x_1,\ldots,x_{15}) = 0, \qquad m = 1,\ldots,5;$$
$$\psi_1 = x_{16} + \varphi_1; \quad \psi_2 = x_{17} + \varphi_2; \quad \psi_3 = x_{18} + \varphi_3;$$
$$\psi_4 = x_{19} + \varphi_4; \quad \psi_5 = x_{20} + \varphi_5. \qquad (3)$$

Инвариантные многообразия (3) должны удовлетворять решению системы функциональных уравнений АКАР [1]:

$$T_1\dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0; \qquad T_2\dot{\psi}_2(t) + \psi_2 = 0; \qquad T_3\dot{\psi}_3(t) + \psi_3 = 0;$$

$$T_4\dot{\psi}_4(t) + \psi_4 = 0; \qquad T_5\dot{\psi}_5(t) + \psi_5 = 0. \qquad (4)$$

При попадании изображающей точки системы на пересечение многообразий $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$, $\psi_3 = 0$, $\psi_4 = 0$, $\psi_5 = 0$, согласно принципу «расширения — сжатия фазового пространства», происходит декомпозиция исходной системы (1), и динамика системы описывается системой дифференциальных уравнений пониженного порядка [1, 5]:

$$\dot{x}_{1\psi} = -k_1 d_1 x_{1\psi} + k_2 d_1 x_{2\psi} - k_1 d_2 x_{1\psi} + k_6 d_2 x_{6\psi} - k_1 d_3 x_{1\psi} + k_{11} d_3 x_{11\psi} - $$
$$-(F_0 - \sin(x_{1\psi}))\frac{x_{2\psi} - x_{1\psi}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{2\psi} = k_1 d_1 x_{1\psi} - 2k_2 d_1 x_{2\psi} + k_3 d_1 x_{3\psi} - k_2 d_2 x_{2\psi} + k_7 d_2 x_{7\psi} - k_2 d_3 x_{2\psi} + k_{12} d_3 x_{12\psi} - $$
$$-(F_0 - \sin(x_{2\psi}))\frac{x_{3\psi} - x_{2\psi}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{3\psi} = k_2 d_1 x_{2\psi} - 2k_3 d_1 x_{3\psi} + k_4 d_1 x_{4\psi} - k_3 d_2 x_{3\psi} + k_8 d_2 x_{8\psi} - k_3 d_3 x_{3\psi} + k_{13} d_3 x_{13\psi} - $$
$$-(F_0 - \sin(x_{3\psi}))\frac{x_{4\psi} - x_{3\psi}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{4\psi} = k_3 d_1 x_{3\psi} - 2k_4 d_1 x_{4\psi} + k_5 d_1 x_{5\psi} - k_4 d_2 x_{4\psi} + k_9 d_2 x_{9\psi} - k_4 d_3 x_{4\psi} + k_{14} d_3 x_{14\psi} - $$
$$-(F_0 - \sin(x_{4\psi}))\frac{x_{5\psi} - x_{4\psi}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{5\psi} = k_4 d_1 x_{4\psi} - k_5 d_1 x_{5\psi} - k_5 d_2 x_{5\psi} + k_{10} d_2 x_{10\psi} - k_5 d_3 x_{5\psi} + k_{15} d_3 x_{15\psi};$$

$$\dot{x}_{6\psi} = -k_6 d_1 x_{6\psi} + k_7 d_1 x_{7\psi} + k_1 d_2 x_{1\psi} - 2k_6 d_2 x_{6\psi} - k_6 d_3 x_{6\psi} - k_{16} d_3 \varphi_1 -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{6\psi}))\frac{x_{7\psi} - x_{6\psi}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{7\psi} = k_6 d_1 x_{6\psi} - 2k_7 d_1 x_{7\psi} + k_8 d_1 x_{8\psi} + k_2 d_2 x_{2\psi} - 2k_7 d_2 x_{7\psi} - k_7 d_3 x_{7\psi} - k_{17} d_3 \varphi_2 -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{7\psi}))\frac{x_{8\psi} - x_{7\psi}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{8\psi} = k_7 d_1 x_{7\psi} - 2k_8 d_1 x_{8\psi} + k_9 d_1 x_{9\psi} + k_3 d_2 x_{3\psi} - 2k_8 d_2 x_{8\psi} - k_8 d_3 x_{8\psi} - k_{18} d_3 \varphi_3 -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{8\psi}))\frac{x_{9\psi} - x_{8\psi}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{9\psi} = k_8 d_1 x_{8\psi} - 2k_9 d_1 x_{9\psi} + k_{10} d_1 x_{10\psi} + k_4 d_2 x_{4\psi} - 2k_9 d_2 x_{9\psi} - k_9 d_3 x_{9\psi} - k_{19} d_3 \varphi_4 -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{9\psi}))\frac{x_{10\psi} - x_{9\psi}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{10\psi} = k_9 d_1 x_{9\psi} - k_{10} d_1 x_{10\psi} + k_5 d_2 x_{5\psi} - 2k_{10} d_2 x_{10\psi} - k_{10} d_3 x_{10\psi} - k_{20} d_3 \varphi_5; \quad (5)$$
$$\dot{x}_{11\psi} = -k_{11} d_1 x_{11\psi} + k_{12} d_1 x_{12\psi} - k_{11} d_2 x_{11\psi} - k_{16} d_2 \varphi_1 + k_1 d_3 x_{1\psi} - k_{11} d_3 x_{11\psi} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{11\psi}))\frac{x_{12\psi} - x_{11\psi}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{12\psi} = k_{11} d_1 x_{11\psi} - 2k_{12} d_1 x_{12\psi} + k_{13} d_1 x_{13\psi} - k_{12} d_2 x_{12\psi} - k_{17} d_2 \varphi_2 + k_2 d_3 x_{2\psi} - k_{12} d_3 x_{12\psi} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{12\psi}))\frac{x_{13\psi} - x_{12\psi}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{13\psi} = k_{12} d_1 x_{12\psi} - 2k_{13} d_1 x_{13\psi} + k_{14} d_1 x_{14\psi} - k_{13} d_2 x_{13\psi} - k_{18} d_2 \varphi_3 + k_3 d_3 x_{3\psi} - k_{13} d_3 x_{13\psi} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{13\psi}))\frac{x_{14\psi} - x_{13\psi}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{14\psi} = k_{13} d_1 x_{13\psi} - 2k_{14} d_1 x_{14\psi} + k_{15} d_1 x_{15\psi} - k_{14} d_2 x_{14\psi} - k_{19} d_2 \varphi_4 + k_4 d_3 x_{4\psi} - k_{14} d_3 x_{14\psi} -$$
$$-(F_0 - \sin(x_{14\psi}))\frac{x_{15\psi} - x_{14\psi}}{\Delta x};$$
$$\dot{x}_{15\psi} = k_{14} d_1 x_{14\psi} - k_{15} d_1 x_{15\psi} - 2k_{15} d_2 x_{15\psi} - k_{20} d_2 \varphi_5 + k_5 d_3 x_{5\psi} - k_{15} d_3 x_{15\psi};$$

неизвестные функции φ_1, φ_2, φ_3, φ_4, φ_5 - «внутренние» управления.

На втором этапе синтеза для поиска внешних управлений вводится вторая группа «внутренних» инвариантных многообразий по числу каналов внутренних управлений:

$$\psi_m(x_1,\ldots,x_5) = 0, \qquad m = 6,\ldots,10;$$
$$\psi_6 = x_6 + \varphi_6; \quad \psi_7 = x_7 + \varphi_7; \quad \psi_8 = x_8 + \varphi_8;$$
$$\psi_9 = x_9 + \varphi_9; \quad \psi_{10} = x_{10} + \varphi_{10}, \quad (6)$$

где $\varphi_6 - \varphi_{10}$ – неизвестные «внутренние» управления, которые необходимо доопределить в процессе синтеза.

Инвариантные многообразия (6) должны удовлетворять решению системы функциональных уравнений АКАР:

$$T_6\dot{\psi}_6(t) + \psi_6 = 0; \quad T_7\dot{\psi}_7(t) + \psi_7 = 0;$$
$$T_8\dot{\psi}_8(t) + \psi_8 = 0; \quad T_9\dot{\psi}_9(t) + \psi_9 = 0; \quad T_{10}\dot{\psi}_{10}(t) + \psi_{10} = 0. \quad (7)$$

На пересечении совокупности внутренних инвариантных многообразий $\psi_6 = 0$, $\psi_7 = 0$, $\psi_8 = 0$, $\psi_9 = 0$, $\psi_{10} = 0$ динамика системы определяется декомпозированной системой пониженного порядка:

$$\dot{x}_{1\psi} = -k_1 d_1 x_{1\psi} + k_2 d_1 x_{2\psi} - k_1 d_2 x_{1\psi} - k_6 d_2 \varphi_6 - k_1 d_3 x_{1\psi} + k_{11} d_3 x_{11\psi} - -(F_0 - \sin(x_{1\psi}))\frac{x_{2\psi} - x_{1\psi}}{\Delta x};$$

$$\dot{x}_{2\psi} = k_1 d_1 x_{1\psi} - 2k_2 d_1 x_{2\psi} + k_3 d_1 x_{3\psi} - k_2 d_2 x_{2\psi} - k_7 d_2 \varphi_7 - k_2 d_3 x_{2\psi} + k_{12} d_3 x_{12\psi} - -(F_0 - \sin(x_{2\psi}))\frac{x_{3\psi} - x_{2\psi}}{\Delta x};$$

$$\dot{x}_{3\psi} = k_2 d_1 x_{2\psi} - 2k_3 d_1 x_{3\psi} + k_4 d_1 x_{4\psi} - k_3 d_2 x_{3\psi} - k_8 d_2 \varphi_8 - k_3 d_3 x_{3\psi} + k_{13} d_3 x_{13\psi} - -(F_0 - \sin(x_{3\psi}))\frac{x_{4\psi} - x_{3\psi}}{\Delta x};$$

$$\dot{x}_{4\psi} = k_3 d_1 x_{3\psi} - 2k_4 d_1 x_{4\psi} + k_5 d_1 x_{5\psi} - k_4 d_2 x_{4\psi} - k_9 d_2 \varphi_9 - k_4 d_3 x_{4\psi} + k_{14} d_3 x_{14\psi} - -(F_0 - \sin(x_{4\psi}))\frac{x_{5\psi} - x_{4\psi}}{\Delta x};$$

$$\dot{x}_{5\psi} = k_4 d_1 x_{4\psi} - k_5 d_1 x_{5\psi} - k_5 d_2 x_{5\psi} - k_{10} d_2 \varphi_{10} - k_5 d_3 x_{5\psi} + k_{15} d_3 x_{15\psi}. \quad (8)$$

На третьем этапе декомпозиции для поиска «внутренних» управлений вводится вторая группа «внутренних» инвариантных многообразий $\psi_{11} = 0$, $\psi_{12} = 0$, $\psi_{13} = 0$, $\psi_{14} = 0$, $\psi_{15} = 0$ по числу каналов с внутренними управлениями [1]:

$$\psi_{11} = x_1 - x_1^0 = 0; \quad \psi_{12} = x_2 - x_2^0 = 0; \quad \psi_{13} = x_3 - x_3^0 = 0;$$
$$\psi_{14} = x_4 - x_4^0 = 0; \quad \psi_{15} = x_5 - x_5^0 = 0. \quad (9)$$

Инвариантные многообразия (9) должны удовлетворять решению системы функциональных уравнений АКАР:

$$T_{11}\dot{\psi}_{11} + \psi_{11} = 0; \quad T_{12}\dot{\psi}_{12} + \psi_{12} = 0; \quad T_{13}\dot{\psi}_{13} + \psi_{13} = 0;$$
$$T_{14}\dot{\psi}_{14} + \psi_{14} = 0; \quad T_{15}\dot{\psi}_{15} + \psi_{15} = 0. \quad (10)$$

В обратном порядке, совместно решая системы уравнений (8), (9), (10), определяем группу «внутренних» управлений φ_6, φ_7, φ_8, φ_9, φ_{10}. После этого из совместного решения систем уравнений (5), (6), (7) определяем группу «внутренних» управлений φ_1, φ_2, φ_3, φ_4, φ_5, а из совместного решения систем уравнений (1), (3), (4) находим неизвестные внешние управления u_1, u_2, u_3, u_4, u_5.

Результаты моделирования. Численное моделирование проводилось при следующих параметрах настройки регулятора: $T_1 = 0.8$; $T_2 = 0.9$; $T_3 = 0.7$; $T_4 = 0.8$; $T_5 = 0.9$; $T_6 = 0.8$; $T_7 = 0.7$; $T_8 = 0.6$; $T_9 = 0.9$; $T_{10} = 0.8$; $T_{11} = 0.9$; $T_{12} = 0.8$; $T_{13} = 0.9$; $T_{14} = 0.8$; $T_{15} = 0.8$, а также следующих параметрах объекта управления: $\eta = 0.000004$ 1/м; $\Delta x = 250$; $\Delta y = 166$; $\Delta z = 40$; $k_1 = 0.05$; $k_2 = 0.06$; $k_3 = 0.06$; $k_4 = 0.07$; $k_5 = 0.07$; $k_6 = 0.08$; $k_7 = 0.02$; $k_8 = 0.05$; $k_9 = 0.01$; $k_{10} = 0.01$; $k_{11} = 0.01$; $k_{12} = 0.12$; $k_{13} = 0.02$; $k_{14} = 0.09$; $k_{15} = 0.07$; $k_{16} = 0.07$; $k_{17} = 0.02$; $k_{18} = 0.01$; $k_{19} = 0.11$; $k_{20} = 0.03$ м/сут; $F_0 = 2.5$. Начальные условия по переменным состояния были выбраны нулевыми: отсутствие внешнего воздействия.

На рис. 1 представлены результаты моделирования: переходные процессы переменных состояний x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 по каждой контрольной скважине, стабилизирующихся к установившемуся значению (2). На рис.2

изображены изменения (стабилизация) во времени управляющих воздействий u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 по каждой эксплуатационной скважине. На рис.3 дана проекция фазового пространства на координаты $x_1 - x_2 - x_3$, фазовый портрет, пересечение внешних инвариантных многообразий $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$ в трехмерном фазовом пространстве, в котором фазовые траектории, стартуя из произвольных начальных условий, под действием управлений попадают на пересечение многообразий, а затем движутся к установившемуся состоянию. На рис. 4 изображены переходные процессы дебитов эксплуатационных скважин в м^3/сут.

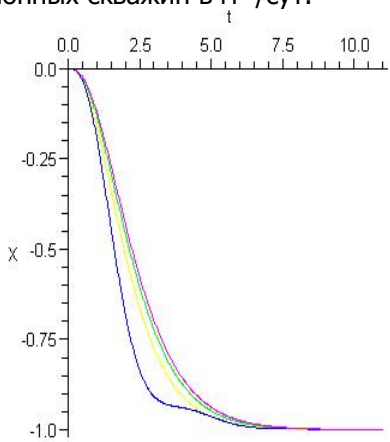


Рис. 1. Переходный процесс переменных состояний

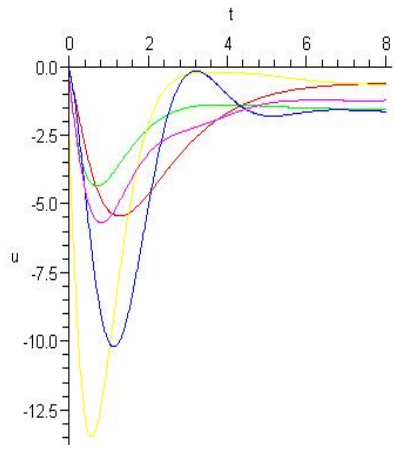


Рис. 2. Управляющие воздействия

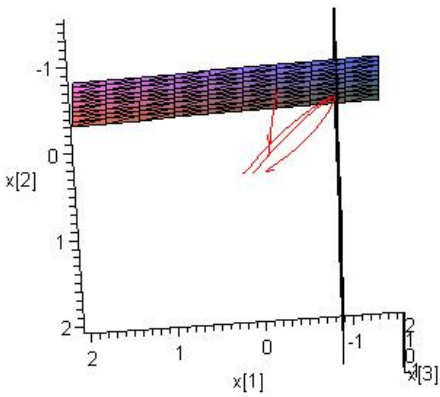


Рис. 3. Фазовое пространство

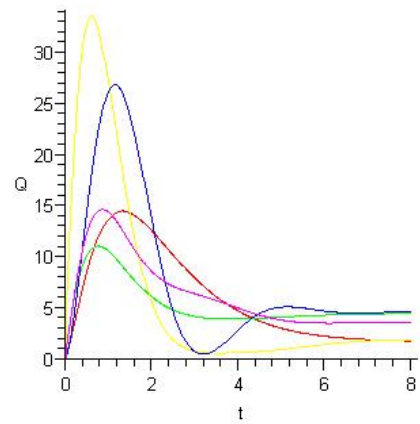


Рис. 4. Дебит эксплуатационных скважин

Выводы. Синтезированные нелинейные законы управления u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 методом АКАР обеспечивают асимптотическую устойчивость движения в целом замкнутой системы относительного заданного состояния, определяемого требованиями процесса управления. Для того чтобы забрать из эксплуатационных скважин 1, 2, 3, 4, 5 м^3/сут необходимо понизить уровень водоносного горизонта в эксплуатационных скважинах на 0.1-1,0 м. На рис.1 видно, что стабилизация переходного процесса (понижение уров-

ня в контрольных скважинах) произойдет примерно через 9 суток после начала действия возмущающего воздействия.

Библиографический список

1. *Атрощенко О.И.* Основные положения синергетического подхода. Постановка нелинейной проблемы аналитического конструирования агрегированных регуляторов / О.И. Атрощенко // Сб. науч. тр. Сев.-Кав. гос. техн.ун-та. – 2008. – № 4. – С.16-19.

2. *Атрощенко О.И.* Синергетический синтез системы управления дебитом водозаборных скважин методом АКАР / О.И. Атрощенко // Вестник Сев.-Кав. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 2(15). – С.53-57.

3. *Малков А.В.* Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидролитосферными процессами / А.В. Малков, И.М. Першин. – М.: Научный мир, 2007.

4. *Першин И.М.* Анализ и синтез систем с распределенными параметрами / И.М. Першин. – Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на КМВ, 2007.

5. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления; под ред. А.А. Колесникова. – Ч.II. –Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.

Материал поступил в редакцию 4.07.08.

O.I.ATROSHCHENKO

SINERGETICHESKY SYNTHESIS OF MANAGEMENTS FOR THE NONLINEAR SPATIALLY-NOT INVARIANT OBJECT OF MANAGEMENT

Application of method АКАР («Analytical designing of the aggregated regulators on the set invariant varieties») sinergetics theories of management for synthesis of laws of management by spatially-nenvariantnym nonlinear distributed object of management is considered. The object of management chooses water horizont the Central site of the Kislovodsk deposit of mineral waters.

АТРОЩЕНКО Олег Игоревич (р.1983), аспирант кафедры «Управление и информатика в технических системах» Пятигорского государственного технологического университета. В 2005 г. окончил Кисловодский гуманитарно-технический институт

Область научных интересов: управление, математическое моделирование, автоматика, системы управления с распределенными параметрами.

Автор шести научных статей.

УДК 539.3;612.13

К.С. АХВЕРДИЕВ, Г.В. ЧУДИНОВ, Е.В. ФОМИЧЕВ, М.К. АХВЕРДИЕВА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ТЕЧЕНИЯ КРОВИ В КРОВЕНОСНОМ СОСУДЕ В ВИДЕ МОДЕЛИ РАЗДЕЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В СУЖАЮЩЕЙСЯ КОНИЧЕСКОЙ ТРУБКЕ

В работе на основе модели раздельного течения двух несмешивающихся жидкостей в сужающейся конической трубке решена задача о математическом моделировании стратифицированного течения крови в кровеносном сосуде. Дана оценка влияния вязкостных отношений слоев на профили распределения скоростей и на относительный расход.

Ключевые слова: *модель, стратифицированное течение, коническая трубка, пристенчатый эффект.*

Как известно [1-3], кровь, движущаяся по кровеносным сосудам, может рассматриваться как суспензия (жидкость со взвешанными в ней частицами). Течение такой суспензии обладает такими свойствами, что в узкой зоне около стенок сосуда взвешанные частицы отсутствуют. Это явление носит название пристенчатого эффекта. При этом концентрация жидкости большой вязкости практически равна нулю у стенок сосуда и максимальна в окрестности ее оси. Таким образом, учет пристенчатого эффекта требует при изучении движения крови в кровеносных сосудах учесть слоистый характер ее движения, опираясь на уравнения Навье-Стокса.

В данной работе решается задача о стратифицированном (слоистом) течении двух несмешивающихся жидкостей в сужающейся конической трубке (рис.1).

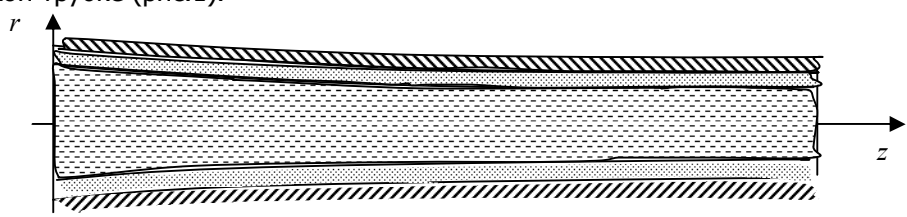


Рис.1. Схематическое изображение слоистой жидкости в конической трубке

В качестве исходных уравнений берется линейная система уравнений Навье-Стокса для случая «тонкого слоя» для вязкой несжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial^2 \upsilon_{z_i}}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial \upsilon_{z_i}}{\partial r}=\frac{1}{\mu_j}\frac{\partial P_i}{\partial z},\ \frac{\partial \upsilon_{r_i}}{\partial r}+\frac{\upsilon_{r_i}}{r}+\frac{\partial \upsilon_{z_i}}{\partial z}=0,\ (i=1,2), \qquad (1)$$

где $\upsilon_{z_i}, \upsilon_{r_i}$ – компоненты вектора скорости; μ_i – динамический коэффициент вязкости; p_i – давление в слоях; r, z – цилиндрическая система коэффициентов.

Система уравнений (1) решается при следующих граничных условиях:

– условие прилипания жидкости к стенкам трубки;

– ограниченность функции υ_z и υ_r на оси трубки;

– на границе раздела слоев равенство нормальных и касательных напряжений и условие (стратифицирование) раздельного течения жидкости.

Входное и выходное давление считается заданными.

Введем функцию тока $\psi_i(r,z)$ по формулам:

$$r\upsilon_{r_i} = -\frac{\partial \psi_i}{\partial z},\ r\upsilon_z = \frac{\partial \psi_i}{\partial r}. \qquad (2)$$

С учетом (2) уравнения (1) можно записать в виде:

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial \psi_i}{\partial r}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial \psi_i}{\partial r}\right)=\frac{1}{\mu_i}\frac{dp_i}{\partial z},\ (i=1,2). \qquad (3)$$

Точное автомодельное решение задачи. Решение системы уравнений (3) будем искать в виде

$$\psi_i = \widetilde{\psi_i}(\xi),\ \frac{1}{\mu_i}\frac{dp_i}{dz}=\frac{c_i}{e^{-4\alpha z}},\ \xi=\frac{r}{e^{-\alpha z}}. \qquad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим:

$$\frac{d^2}{d\xi^2}\left(\frac{1}{\xi}\frac{d\psi_i}{d\xi}\right)+\frac{1}{\xi}\frac{d}{d\xi}\left(\frac{1}{\xi}\frac{d\widetilde{\psi_i}}{d\xi}\right)=c_i(i=1,2). \qquad (5)$$

Граничные условия при этом записываем в виде:

$$\frac{d\widetilde{\psi_2}}{d\xi}=0 \text{ при } \xi=A_2;\ \frac{d\widetilde{\psi_1}}{d\xi}=\frac{d\widetilde{\psi_2}}{d\xi} \text{ при } \xi=A_1;$$

$$\mu_1\frac{d^2\widetilde{\psi_1}}{d\xi^2}=\mu_2\frac{d^2\widetilde{\psi_2}}{d\xi^2} \text{ при } \xi=A_1;\ \frac{d\widetilde{\psi_1}}{d\xi}=0 \text{ при } \xi=0. \qquad (6)$$

Здесь $r=A_2e^{-\alpha z}$, $r=A_1e^{-\alpha z}$ – соответственно уравнения контура стенки конической трубки и границы раздела слоев жидкости $(A_2>A_1)$, $\alpha=const.$

Условия раздельного (стратифицированного) движения на границе раздела слоев автоматически выполняются, поскольку

$$\upsilon_{r_i}\Big/\upsilon_{\theta_i} = -A_1e^{-\alpha z}\alpha \text{ при } \xi=A_1,$$

поэтому на границе раздела вектор скорости направлен по касательной к контуру раздела слоев жидкостей.

Решение задачи (5)-(6) находим непосредственным интегрированием, в результате получаем:

$$\widetilde{\psi}'_1 = \frac{c_1\xi^3}{4} + c_3\xi\ln\xi + c_4\xi,\ \widetilde{\psi}'_2 = \frac{c_2\xi^3}{4} + c_5\xi\ln\xi + c_6\xi. \qquad (7)$$

Используя граничные условия (5) для определения постоянных интегрирования, придем к следующей системе алгебраических уравнений:

$$\frac{c_2A_2^3}{4} + c_5A_2\ln A_2 + c_6A_2 = 0,$$

$$c_3 = 0,\ \frac{c_1A_1^3}{4} + c_4A_1 = \frac{c_2A_1^3}{4} + c_5A_1\ln A_1 + c_6A_1,$$

$$\frac{3}{4}A_1^2c_1 + c_4 = \frac{\mu_2}{\mu_1}\left(\frac{3}{4}c_2A_1^2 + c_5\ln A_1 + c_5 + c_6\right). \qquad (8)$$

Решив систему (8), получим:

$$c_1 = \frac{\mu_2}{\mu_1}c_2;\ c_2 = \frac{p_{вых} - p_{вх}}{\mu_2(e^{\alpha l} - e^{\alpha z_0})};$$

$$c_3 = 0;\ c_4 = c_2\frac{A_1^2}{4} + c_5\ln\frac{A_1}{A_2} - c_2\frac{A_2^2}{4} - \frac{c_1A_1^2}{4};$$

$$c_5 = \frac{c_2\frac{A_2^2}{4}\left(1 - \frac{\mu_2}{\mu_1}\right) + \frac{A_1^2}{4}c_2\left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1\right)}{\frac{\mu_2}{\mu_1}\ln\frac{A_1}{A_2} + \frac{\mu_2}{\mu_1} - \ln\frac{A_1}{A_2}};\ c_6 = -\frac{c_2A_2^2}{4} - c_5\ln A_2. \qquad (9)$$

Расход в любом сечении трубки определяется выражением:

$$Q = Q_1 + Q_2, \qquad (10)$$

где

$$Q_1 = \int_0^{A_1}\left(\frac{c_1}{4}\xi^3 + c_4\xi\right)d\xi = \frac{c_1A_1^4}{16} + \frac{c_4A_1^2}{2};$$

$$Q_2 = \int_{A_1}^{A_2}\left(\frac{c_2}{4}\xi^3 + c_5\xi\ln\xi + c_6\xi\right)d\xi = \frac{c_2}{16}\left(A_2^4 - A_1^4\right) + c_5\left(\frac{A_1^2}{4} - \frac{A_2^2}{4}\right) +$$

$$\frac{c_2A_2^2}{8}\left(A_1^2 - A_2^2\right) + c_5\frac{A_1^2}{2}\ln\frac{A_2}{A_1};\ A_2 > A_1.$$

С учетом формул (2) и (7) для компоненты скорости υ_z получим следующие выражения:

$$\upsilon_z^{(1)} = \frac{1}{e^{-2\alpha z}}\left(\frac{c_1\xi^2}{4} + c_4\right),\ 0 \le \xi \le A_1;$$

$$\upsilon_z^{(2)} = \frac{1}{e^{-2\alpha z}}\left(c_2 \frac{\xi^2}{4} + c_5 \ln \xi + c_6 \right), \quad A_1 \le \xi \le A_2. \qquad (11)$$

Из формул (11) с учетом (9) будем иметь:

$$\frac{\upsilon_z^{(1)}}{\upsilon_z^{(1)}\big|_{\xi=0}} = \frac{c_1 \frac{\xi^2}{4} + c_4}{c_4} = \frac{\frac{\mu_2}{\mu_1}\frac{\xi^2}{4} + \frac{A_1^2}{4} - \frac{A_2^2}{4} - \frac{A_1^2}{4}\frac{\mu_2}{\mu_1} + \Delta \ln \frac{A_1}{A_2}}{\frac{A_1^2}{4} - \frac{A_2^2}{4} - \frac{A_1^2}{4}\frac{\mu_2}{\mu_1} + \Delta \ln \frac{A_1}{A_2}}, \quad 0 \le \xi \le A_1;$$

$$\frac{\upsilon_z^{(2)}}{\upsilon_z^{(1)}\big|_{\xi=0}} = \frac{c_2 \frac{\xi^2}{4} + c_5 \ln \xi + c_6}{c_4} = \frac{\frac{\xi^2}{4} - \frac{A_2^2}{4} + \Delta \ln \frac{\xi}{A_2}}{\frac{A_1^2}{4} - \frac{A_2^2}{4} - \frac{A_1^2}{4}\frac{\mu_2}{\mu_1} + \Delta \ln \frac{A_1}{A_2}}, \quad A_1 \le \xi \le A_2, \qquad (12)$$

где $\Delta = \dfrac{\frac{A_2^2}{4}\left(1 - \frac{\mu_2}{\mu}\right) + \frac{A_1^2}{4}\left(\frac{\mu_2}{\mu} - 1\right)}{\frac{\mu_2}{\mu_1}\ln\frac{A_1}{A_2} + \frac{\mu_2}{\mu_1} - \ln\frac{A_1}{A_2}}$.

Из зависимостей, приведенных на рис.2, следует, что чем меньше вязкость слоя жидкости, прилегающая к стенкам сосуда, тем более максимальное значение относительной осевой составляющей скорости этого слоя.

С учетом формул (11) для относительного значения расхода $\widetilde{Q} = \left(Q_1 + Q_2\right)/Q_1$ получим следующее выражение:

$$\widetilde{Q} = 1 + \frac{Q_1}{Q_2} = 1 + \frac{\frac{A_1^4}{16}\frac{\mu_2}{\mu_1} + \frac{A_1^2}{2}\left(\frac{A_1^2}{4} + \Delta \ln \frac{A_1}{A_2} - \frac{A_2^2}{4} - \frac{A_1^2}{8}\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)}{\frac{A_2^4 - A_1^4}{16} + \Delta\left(\frac{A_1^2}{4} - \frac{A_2^2}{4} + \frac{A_1^2}{2}\ln\frac{A_2}{A_1}\right) + \frac{A_2^2}{8}\left(A_1^2 - A_2^2\right)}. \qquad (13)$$

Значения относительного расхода Q при различных значениях отношения вязкости слоев и от отношения протяженности слоев

A_2/A_1	μ_2/μ_1	$1 + \frac{Q_2}{Q_1} = \widetilde{Q}$
1/8	1/2	1,658
1/4	1/2	1,771
1/3	1/2	1,875
1/8	1/3	1,6379
1/4	1/3	1,718
1/3	1/3	1,78
1/8	1/4	1,632
1/4	1/4	1,705
1/3	1/4	1,761

Из зависимостей, приведенных в таблице, следует, что чем меньше μ_2/μ_1, тем меньше относительное значение расхода $\widetilde{Q}$. При этом с увеличением толщины пристенчатого слоя относительное значение расхода $\widetilde{Q}$ резко возрастает. Как и следовало ожидать, при $\mu_2 = \mu_1$ в предельном случае $A_1 \to 0,\ Q_1 \to 0,\ Q \to 1.$

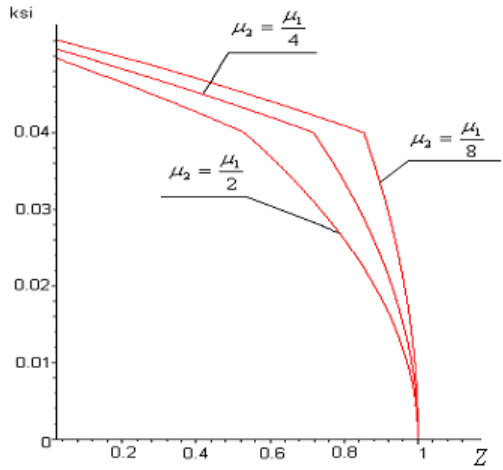


Рис. 2. Эпюра распределения относительной осевой составляющей скорости $\left(A_1 = 0,03\,\text{см},\ A_2 - A_1 = 0,04\,\text{см}\right)$

Библиографический список

1. *Каро К.* Механика кровообращения / К.Каро, Т.Педли, Р.Шротер, У.Сид. – М.: Мир, 1981. - С.179-187.

2. *Cavalcanti S.* Hemodynamics of an artery with midl stenosis // J. Biomech. – 1995. – 28. – №4. – P.387-399.

3. *Pedley T.J.* The fluid mechanics of large blood vessels. – London: Cambridge University Press, 1980. – 540 p.

Материал поступил в редакцию 08.07.08.

K.S. AKHVERDIEV, J.V. CHUDINOV, E.V. FOMICHEV, M.K. AKHERDIEVA

MATHEMATICAL MODELING OF STRATIFIED CURRENT OF BLOOD IN ABLOODVESSEL IN THE FORM OF A MODEL OF SEPARATE CURRENT OF TWO UNMIXED LIQUIDS IN A NARROWING CONIC TUBE

The problem of mathematical modelling of stratified blood current in a blood vessel has been soled in the paper on the basis of a model of separated current of two inmixed liquids in a narrowing conic tube. The influence of viscidity relations of strata on the types of speed distribution and relative expenses nave been evaluated.

АХВЕРДИЕВ Камил Самедович (р.1938), заведующий кафедрой «Высшая математика-2» Ростовского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ. Окончил Азербайджанский государственный университет (1962).
Научные интересы: гидродинамическая теория смазки.
Имеет 350 научных работ.

ЧУДИНОВ Георгий Викторович (р.1965), доктор медицинских наук Ростовской областной клинической больницы (РОКБ) сердечно-сосудистой хирургии, кардиохирург.
Автор более 100 научных работ.

ФОМИЧЕВ Евгений Викторович (р.1977), сердечно-сосудистый хирург Ростовской областной клинической больницы (РОКБ).
Имеет более 200 научных работ.

АХВЕРДИЕВА Милана Камиловна, кандидат медицинских наук Ростовского государственного медицинского университета (РГМУ).
Область научных интересов: кардиология.
Имеет более 100 научных работ.

УДК 631.3

**В.С.СИМАНКОВ, С.Н.ВЛАДИМИРОВ,
А.О.ДЕНИСЕНКО, А.Н.ЧЕРКАСОВ**

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В статье раскрываются теоретические аспекты построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений, этапы разработки и построение функциональной схемы системы поддержки принятия решений посредством комплексного применения математических методов для решения задач, выдвигаемых различными видами деятельности.

Ключевые слова: *система поддержки принятия решений, алгоритм, методы принятия решений, альтернатива, критерий, решающее правило, функциональная схема.*

Введение. *Под системой поддержки принятия решений (СППР)* понимается информационная система, предназначенная для формализации и актуализации слабоструктурированных и неструктурированных задач планирования, прогнозирования и управления, максимально приспособленных к адекватной оценки повседневных управленческих проблем и используемых в качестве инструмента экспертами и системными аналитиками.

Общий алгоритм поддержки принятия решений, состоящий из этапов, наиболее удобно представить в виде IDEF0-диаграммы, приведенной на рис.1 [1]:

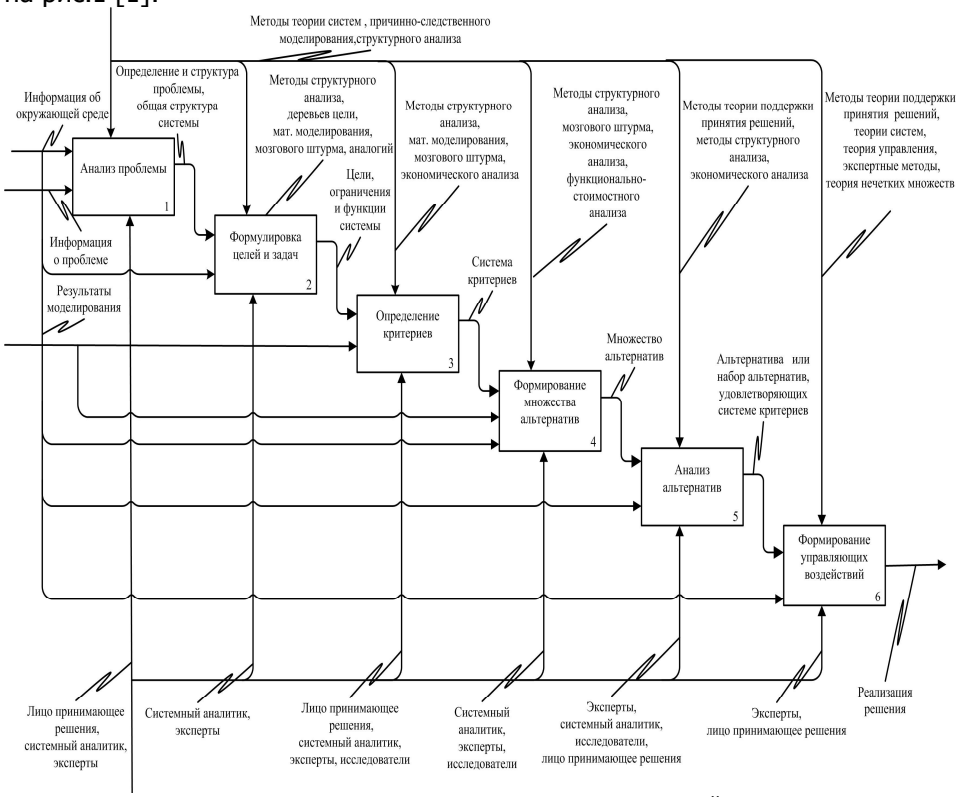


Рис. 1. Алгоритм поддержки принятия решений

Рассмотренная иерархическая последовательность показывает, что переход к последующему этапу затруднен без реализации предыдущего, но возможны итерации, т. е. повторения несколько раз одного и того же этапа или совокупности этапов для достижения наиболее эффективного результата.

Методы исследования. Формально система поддержки принятия решений с точки зрения системного анализа может быть представлена в виде кортежа [2]:

$$\langle P,S,Z,K,SH,D,M,A,F,G,U,V,W \rangle, \quad (1)$$

где P – математическая проблема; S – определение системы; Z – определение целей системы; K – множество критериев эффективности системы; SH – множество шкал измерений критериев; D – способ исследования системы; M – методы моделирования системы; A – множество альтернатив; F – отображение множества альтернатив на множестве критериев; G – система предпочтений лица принимающего решение (ЛПР); U – вид целевой функции; V – универсальное множество; W – решающее правило, отображающее систему предпочтений.

В соответствии с алгоритмом принятия решений, рассмотрим в отдельности каждый из указанных в нем этапов.

Этап 1. Анализ проблем. Для реализации первого этапа формулирования и анализа проблемы необходимо осуществить следующие шаги:

- мониторинг внешней среды и объекта управления;
- выявление и формирование проблемы, оценка ее новизны;
- установление взаимосвязи с другими проблемами;
- оценка полноты и достоверности информации по данной проблеме;
- ведение базы данных информационных ресурсов по проблеме.

Полученная информация о существующей проблеме анализируется с целью получения подробных данных о самой системе, выявления общей структуры проблематики и возможности использования ее для определения цели и формулировании задач [1].

Математически можно определить проблему P_t следующим образом:

$$P_t = \left| A_t - A_t^0 \right|, \quad (2)$$

где A_t – действительное состояние в момент времени t; A_t^0 - желаемое состояние в момент времени t.

Этап 2. Формулировка целей и задач. На данном этапе определяются цели системы (Z), формулируется глобальная цель, ограничения и вырабатывается последовательность задач для достижения целей:

- определение разрешимости проблемы;
- концептуальная разработка вариантов решения проблемы;
- оценка вариантов решения проблемы;
- декомпозиция выявленной проблемы на отдельные задачи;
- постановка задач на вербальном уровне;
- формулировка условий и целей;
- логический анализ условий, целей и задач на вербальном уровне;
- постановка задач исполнителям.

С точки зрения системного анализа формирование целей наиболее

эффективно провести при помощи теории нечетких множеств и экспертных методов, в частности метода Делфи (Деп. 22.01.08 № 45-В2008).

В теории нечетких множеств для определения целей и задач необходимо существование некоторого множества альтернатив-целей $A_Z = \{a_i\}$. Тогда нечёткая цель Z' будет отождествляться с фиксированным нечётким множеством целей во множестве $A_{Z'}$.

На данном этапе возможно использование и малоформализованных методов, например морфологического анализа, целью которого является представление каждого варианта в виде составных частей (компонентов). Математическая функция формирования цели Z' в таком случае представляется в виде:

$$\psi_{Z'} = \bigcup_{i=1}^{r} \left(\bigcup_{g=1}^{l} q\left(x_{j_g d_g}, x_{j_g d_g}^{i}\right) \right), \qquad (3)$$

где $x_{j_1 d^i_1}, \ldots, x_{j_g d^i_g}$ образуют i-й недопустимый набор, $r = |V|$,

$$q(b,e) = \begin{cases} 1, \text{ где } b = e, \\ 0, \text{ где } b \neq e. \end{cases}$$

После чего формируется множество целей $A = \left\{ x \in A_B \,|\, Q(x) = 0 \right\}$.

Универсальным методом, применимым на всех этапах принятия решений является метод Делфи, алгоритм которого состоит из нескольких этапов:

- определяется значение прогнозируемой величины и рассчитывается дисперсия оценок, определяющая разброс мнений экспертов (N);

- находится среднее квадратичное отклонение прогноза и коэффициент вариации, характеризующий единодушие экспертов;

- по полученным данным оценивают диапазон прогнозируемой величины, в который она попадает с заданной вероятностью p. На основе мнений экспертов диапазон прогнозируемой величины определяется соотношением:

$$\overline{H} - \tau \frac{\sigma}{\sqrt{N}} < \overline{H} < \overline{H} + \tau \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \qquad (4)$$

где τ - величина, зависящая от N и p, имеющая распределение Стьюдента с $(N-1)$-степенями свободы, и определяемая по таблицам в функции от $(N-1)$ и $(1-p)$.

При формировании целей необходимо учитывать такие основные принципы системного анализа, как принцип конечной цели, единства и связности [3].

Этап 3. Выбор критериев и оценка их эффективности. При формировании системы критериев K реализуется последовательность действий: определение системы критериев достижения цели, декомпозиция критериев по подцелям, оценка эффективности критериев.

Процесс формирования системы критериев эффективности является творческим, плохо формализуемым и в значительной мере субъективным, требующим в каждом случае индивидуального подхода, он зависит от неопределенности исходной информации, поэтому необходимо использование различных методов для определения множества критериев. (Деп. 22.01.08 № 45-В2008).

Систему критериев возможно сформировать на основе теории нечетких множеств, где критерий $k_i \in K$ можно представить в виде нечеткого множества $\tilde{k}_i$, которое задано на универсальном множестве V таким образом:

$$\tilde{k}_i = \left\{ \frac{\mu^i(v_1)}{v_1}, \frac{\mu^i(v_2)}{v_2}, \ldots, \frac{\mu^i(v_n)}{v_n} \right\}, \quad (5)$$

где $\mu^i(v_i)$ - степень принадлежности элемента v_i к нечеткому множеству.

В случае полной неопределенности эффективным методов для формирования критериев может оказаться, наряду с методом Делфи, и метод формирования критериев и альтернатив при помощи экспертного опроса. В нем необходимо:

1. От каждого из N экспертов получить множество K_i критериев, которые, по его мнению, следует включить во множество K.

2. Построить общее множество $\tilde{K} = \bigcup_{i=1}^{N} K_i \left(\left| \tilde{K} \right| = n \right)$.

3. Из матрицы $R = (rij), i = \overline{1,N}; j = \overline{1,n};$ вычислить величину $H_j = \sum_{i=1}^{N} rij/N$, которая рассматривается как вероятность принадлежности j-го критерия множеству K.

4. Задачу выбора критериев экспертами формально записать в следующем виде:

$$\left(k_1^*, \ldots, k_N^*\right) = \operatorname{Arg}\left[\max_{k \in K} (\min) Q_K\left(k_i, \ldots, k_N\right) \right]. \quad (6)$$

Однако понятие «критерий» можно рассматривать не только как критериальную функцию, но и как способ сравнения альтернатив. Это означает, что критерием качества альтернативы может служить любой ее признак. После того как такая характеристика найдена (критерий сформирован), появляется возможность ставить задачи выбора и оптимизации.

Этап 4. Формирование множества альтернатив. В задачах принятия решений альтернативы представляют собой конкретные системы (продукты, технические комплексы и т.д.). Процесс формирования множества альтернатив, основанный на эвристических предпочтениях лица, принимающего решения, можно подразделить на три последовательных этапа: генерирование множества альтернатив, структурирование альтернатив, определение подмножества сгенерированых альтернатив.

В зависимости от степени решаемых задач генерацию решений наиболее эффективно проводить с помощью экспертных методов и теории нечетких множеств (Деп. 22.01.08 № 45-В2008). Для генерации нечеткого множества альтернатив формируется некоторое свойство (SV), которое рассматривается как лингвистический терм, при помощи которого образуется совокупность пар:

$$\mathrm{SV}=\left\{\frac{\mu_s\left(v_1\right)}{v_1},\frac{\mu_s\left(v_2\right)}{v_2},\ldots,\frac{\mu_s\left(v_n\right)}{v_n}\right\}, \tag{7}$$

где $V=\left\{v_1,v_2,\cdots v_n\right\}$ - универсальное множество, на котором задается нечеткое множество $A\subset V$; $\mu_s\left(v_i\right)$ – степень принадлежности элемента $v_i\in V$ нечеткому множеству A.

Однако наиболее эффективными в случае формирования множества решений являются экспертные методы, описанные на предыдущих этапах. (Деп. 22.01.08 № 45-В2008).

Этап 5. Анализ альтернатив. Наиболее важным этапом является анализ вариантов решений, в ходе которого необходимо провести оптимизацию альтернатив и выбор наилучшей из множества предложенных, с использованием методологии поддержки принятия решений, включающей разнообразные технологии и методы, которые можно частично или полностью формализовать.

С точки зрения системного анализа к основным этапам анализа альтернативных решений необходимо отнести: анализ неопределенности решения, методы оптимизации и определение решающих функций, оценку возможных решений, выбор оптимального решения.

Как и на предыдущих этапах, в условиях полной неопределенности решения необходимо использование экспертных методов, в частности метода Делфи и экспертных оценок (Деп. 22.01.08 № 45-В2008). Суть метода экспертных оценок для формирования решения состоит в следующем: Все эксперты (L) не могут обмениваться информацией. Обратная связь (O) между ними отсутствует. Возможное решение формируется на основе математического (решающего) правила (W):

$$\varphi\left(x_1,\ldots,x_n\right)=\sum_{i=1}^{N}x_i\alpha_i/\sum_{i=1}^{N}\alpha_i, \tag{8}$$

где $\alpha_i\left(i=\overline{1,N}\right)$ - веса экспертов.

Для определения вида решающей функции (U) и оптимально-компромиссных решений необходимо использовать методы многокритериальной оптимизации. Метод выделения главного критерия оптимальности с наложением ограничений на остальные критерии. Математическая модель принятия оптимального решения сводится к задаче векторной оптимизации [1,3, 4]:

$$\overset{o}{x}=f^{-1}\left[\mathrm{Opt}\,K(x)\equiv\left\{K\middle|\min K_1(x)\right\}\cap P\right., \tag{9}$$

$$D = \left\{ K \middle| K_j \le K_j^o(x), j \in (2,3,\ldots,m) \right\} \cap P$$

где $\overset{o}{x}$ – оптимальное компромиссное решение; f^{-1} – обратное отображение множества допустимых решений во множество векторных оценок; $K_j(x)$ – критерии оптимальности; P – область компромиссов (Парето).

Если критерии ранжированы по важности, то наиболее эффективным методом многокритериальной оптимизации при поиске решения является метод свертывания частных критериев оптимальности в комплексный или метод «обобщенного критерия», нашедший широкое применение и состоящий в следующем:

$$\overset{o}{x} = f^{-1}\left[\operatorname{Opt} K(x) \equiv \left\{ K \middle| \min_{K \in P} \sum_{j \in I2} v_j K_j(x) \right\} \cap P \right], \qquad (10)$$

или

$$\overset{o}{x} = f^{-1}\left[\operatorname*{Opt}_{K \in P} K(x) \equiv \left\{ K \middle| \min_{K \in P} \prod_{j \in I2} K_j^{v_j}(x) \right\} \cap P \right], \qquad (11)$$

$$v_j \in A = \left\{ v \middle| v_j \in [0,1], \sum v_j = 1; j \in I_2 = (1,2,3\ldots,m) \right\},$$

где v_i - коэффициент весомости (важности) критериев; $K_j(x)$ - «нормализованное» значение критерия оптимальности.

В итоге исходная многокритериальная задача сводится к обычной задаче оптимизации по одному обобщенному критерию.

В случае некорректного решения на основе метода «обобщенного критерия» эффективным может оказаться метод функции полезности:

$$\overset{o}{x} = f^{-1}\left[\operatorname{Opt} \Psi(K) \equiv \left\{ \Psi(K) \middle| \min \sum \alpha_j \Psi_j(K) \right\} \cap P \right], \qquad (12)$$

$$v_j \in A = \left\{ v \middle| v_j \in [0,1], \sum v_j = 1; j \in I = (1,2,3\ldots,m) \right\},$$

где $\Psi_j\left(K_j\right) \in [0,1]$ – адекватная функция полезности $\Psi_j\left(K_j\right) = 0$ для наименьшей оценки X_j по j-му критерию и $\Psi_j\left(K_j\right) = 1$ для наибольшей оценки X_j по j-му критерию.

Этап 6. Формирование управляющего воздействия. Этот этап является заключающим в цепочке этапов поддержки принятия решения и фактически является результатом действий СППР на предыдущих этапах. На этапе формирования управляющего воздействия на объект управления ЛПР осуществляет ряд действий, направленных на реализацию предоставленных ему рекомендаций СППР, или внесению корректировки в рекомендуемые СППР воздействия на объект управления с последующим применением к объекту управления. На данном этапе возможно применение экспертных методов и методов оптимизации, рассмотренных на предыдущих этапах (Деп. 22.01.08 № 45-В2008).

Функциональная схема системы поддержки принятия решений для реализации широкого круга задач. Анализ классической схемы теории принятия решений для реализации СППР в рамках одной предметной области выявил необходимость структуризации, оптимизации и актуализации существующих алгоритмов и методов, предназначенных для решения задач в управленческой деятельности.

При необходимости использования больших объемов информации в классической схеме поддержки принятия решений необходимо использовать базы данных и базы знаний, а оптимальное применение методов и правил формирования системы критериев, генерации альтернатив, выбора и анализа альтернатив позволит интеллектуализировать процесс принятия решений.

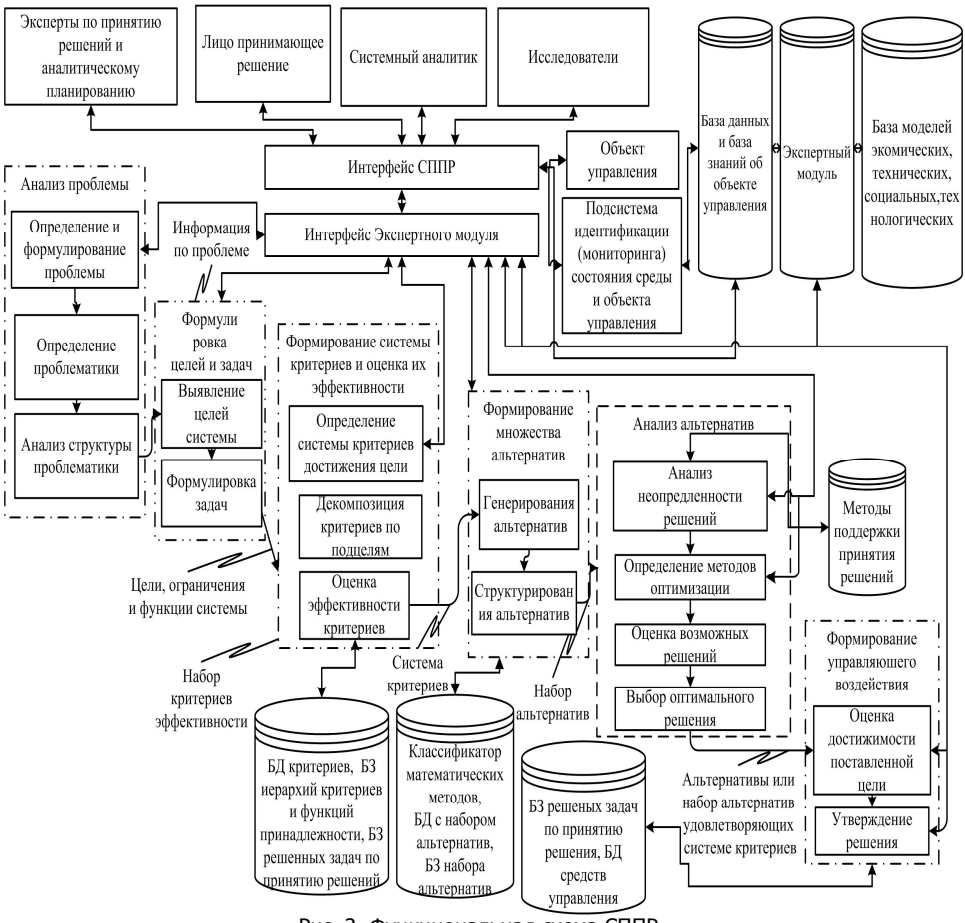


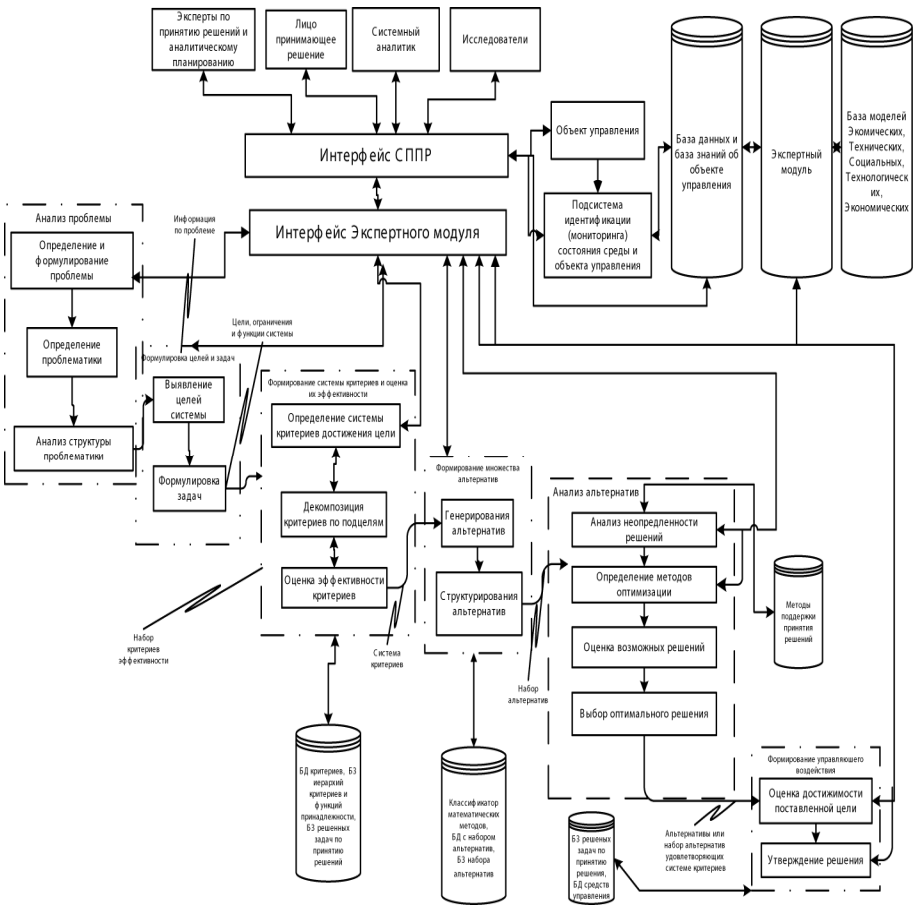
Рис. 2. Функциональная схема СППР

Разработана общая функциональная схема СППР, отвечающая современным требованиям IT-технологий (рис.2). Функциональная схема системы поддержки принятия решений построена таким образом, что при рассмотрении задач, относящихся к различным предметным областям, система перенастраивается на конкретную проблемную ситуацию. Возможность организации БД и БЗ больших объемов позволяет использовать накопленную информацию при решении различных задач с учетом методов генерации решений, формирования системы критериев и выбора решений в зависимости от предметной области проблемы.

Реализация СППР в рамках приведенной схемы дает возможность расширять количество и круг задач при условии программной модернизации СППР и наполнения баз данных СППР и баз знаний СППР. Однако такую сложную систему должны поддерживать специалисты, которые в зависимости от назначения структурных элементов, условно разбиты на группы в соответствии с функциональными обязанностями: системные аналитики, эксперты, исследователи и лица, принимающие решения.

При проектировании, построении и программной реализации системы назначением структурных элементов и функциональных задач пользователей СППР необходима ее ориентация для поддержки принятия решений в рамках определенной предметной области или нескольких областей, а также решение различного класса управленческих задач в соответствии с этими предметными областями.

Алгоритмы и методы поддержки принятия решений использованы в интеллектуальной системы поддержки принятия решений, разработанной в рамках гранта Российского Фонда Фундаментальных исследований «Разработка теоретических основ и построение интеллектуальных систем мониторинга, анализа и поддержки принятия политических, социально- экономических и технологических решений регионального уровня для ситуационных центров органов власти».



Выводы.

1. На основе классической схемы принятия решений и схемы методов, объединяющих основные этапы СППР, построена функциональная схема системы поддержки принятия решений, отвечающая требованиям современных тенденций в области теории принятия решений.

2. Дан анализ методов, математических и эвристических правил на всех этапах принятия решений. Создана схема применения методов для интеллектуальной СППР с точки зрения неопределенности выбора и области применения решаемой задачи, с использованием теории нечетких множеств, экспертных процедур, методов функции полезности и т.д.

3. В разработанной схеме существует возможность использования баз данных и баз знаний, необходимых для хранения, мониторинга и анализа больших объемов информации для работы интеллектуальной системы, ориентированной на поддержку принятия решений различных классов задач. При условии реализации СППР в рамках приведенной схемы существует возможность расширять количество и круг задач в процессе эксплуатации при условии программной модернизации СППР и наполнения баз данных и баз знаний системы.

4. Наличие комплексного набора алгоритмов, методов поддержки принятия решения, используемых на каждом этапе, позволит значительно увеличить число функциональных задач в различных предметных областях управленческой деятельности

Библиографический список

1. *Симанков В.С.* Автоматизация системных исследований / В.С. Симанков. - Краснодар: КубГТУ, 2002. – 376 с.

2. *Кини Р.Л.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х.Райфа; пер. с англ. / под ред. И.Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

3. *Симанков В.С.* Компьютерное моделирование: учеб. пособие / В.С. Симанков. – Краснодар: КубГТУ, 2005. – 244 с.

4. *Катулев А.Н.* Математические методы в системах поддержки принятия решений: учеб. пособие / А.Н. Катулев, Н.А. Северцев. – М.: Высшая школа, 2005. – 311 с.

5. *Макаров И.М.* Теория выбора и принятия решений: учеб. пособие / И.М. Макаров, Т.М. Виноградская, А.А. Рубчинский, В.Б. Соколов. – М.: Наука, 1982. – 328 с.

6. *Перегудов Ф.И.* Основы системного анализа: учебник; 2-е изд., доп. / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – Томск: Изд-во НТЛ, 1997. – 396 с.

7. *Трахтенгерц Э.А.* Компьютерная поддержка принятия решений: научно-практическое издание. / Э.А. Трахтенгерц // Сер. «Информатизация России на пороге XXI века». – М.: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.

8. *Трахтенгерц Э.А.* Компьютерная поддержка формирования целей и стратегий. / Э.А. Трахтенгерц. // Сер. «Системы и проблемы управления». – М.: СИНТЕГ, 2005. – 224 с.

Материал поступил в редакцию 17.07.08.

**V.S. SIMANKOV, S.N. VLADIMIROV,
A.O. DENISENKO, A.N. CHERKASOV**

METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE EXPERT DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEMS' CONSTRUCTION

In the article the theoretical aspects of the functional scheme's construction and the groundwork of the intellectual systems of the decision-making support are scrutinized. They are discovered by means of the complex application of the mathematical methods at the solving of the problems in the various spheres of an activity.

СИМАНКОВ Владимир Сергеевич (р.1947), проректор по научной и инновационной деятельности Кубанского государственного технологического университета, доктор технических наук (2002), профессор (2003). Окончил Краснодарский политехнический институт (1971).
Область научных интересов: системный анализ, синтез, моделирование, оптимизация, адаптивное управление.
Количество публикаций: более 230 научных работ.

ВЛАДИМИРОВ Сергей Николаевич (1979), начальник управления информационных технологий Кубанского государственного технологического университета. Окончил Адыгейский государственный университет (2001).
Область научных интересов: системный анализ, синтез, моделирование, оптимизация, нечеткое управление.
Автор 6 научных публикаций.

ДЕНИСЕНКО Андрей Олегович (р.1978), старший научный сотрудник Кубанского государственного технологического университета. Окончил Адыгейский государственный университет (2001).
Область научных интересов: системный анализ, синтез, оптимизация, нечеткое управление, теория и системы принятия решений, информационно-аналитические системы.
Автор 6 научных публикаций.

ЧЕРКАСОВ Александр Николаевич (р.1979), директор Центра научных исследований информационных технологий Кубанского государственного технологического университета. Окончил Адыгейский государственный университет (2001).
Область научных интересов: системный анализ, синтез, оптимизация, нечеткое управление, моделирование, теория и системы принятия решений.
Имеет 6 научных публикаций.

ИНЖЕНЕРНО-АГРОПРОМЫШЛЕННЫЕ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

УДК 631.316.02-001.5

И.В. ИГНАТЕНКО

ЗАДАЧА ТЕРРАУПРУГОСТИ В ПОЧВООБРАБОТКЕ

Решается задача построения математической модели процесса взаимодействия рабочего органа с почвой с учётом упругости его крепления. Отмечается аналогия её задачам аэро- и гидроупругости в классической механике. Модель построена в виде векторно-матричных уравнений в форме Коши, для чего введено понятие вектора состояния упругозакреплённого рабочего органа. Приведены перспективы применения модели для описания динамических эффектов почвообработки.
Ключевые слова: *почвообработка, рабочий орган, упругость, динамика.*

Введение. Применяемые в почвообработке математические описания взаимодействия рабочего органа с почвой широко используют постулат, что рабочий орган закреплён жёстко, движется поступательно, не отклоняясь от прямолинейной траектории [1]. Это расходится с реальным процессом. Исследования показывают, что движение рабочего органа в почве сопровождается значительными упругими смещениями и колебаниями интенсивностью до 8g по виброускорению [2]. Упругие смещения соизмеримы с глубиной хода и оказывают сильное влияние на качественные и энергетические показатели почвообработки. Величина упругих смещений составляет от 10 до 110 мм; искажения геометрии рабочих органов достигают 20 град/кН [3]. Абсолютно жесткого крепления не существует, поэтому в строгом смысле все крепления рабочих органов почвообрабатывающих машин упругие, и взаимодействие рабочих органов с почвой в земледельческой механике должно рассматриваться обязательно с учётом упругих смещений.

Новый подход к моделированию процесса взаимодействия рабочего органа с почвой связан с учётом его упругих смещений. Это позволяет в почвообработке рассматривать взаимодействие рабочего органа с почвенной средой как задачу терраупругости по аналогии с задачами аэроупругости и гидроупругости в механике, но для среды с более сложными реологическими свойствами.

Постановка задачи. Расчётная схема взаимодействия упругозакреплённого рабочего органа (УРЗО) с почвенной средой представлена на рис. 1. Рабочий орган 3 в виде трёхгранного клина крепится к раме 1 консольной стержневой системой 2 разной степени сложности (стойка, подвеска, грядиль и т.п.), выносящей место крепления за почвенный горизонт. Рама движется поступательно со скоростью V .

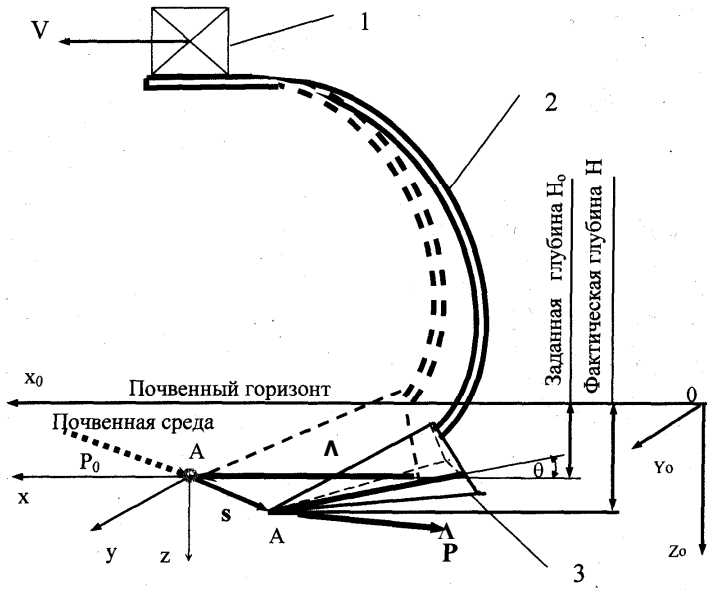


Рис.1. Расчётная схема упругих смещений рабочего органа:
1- рама; 2 – консольная стойка; 3 рабочий орган

Положение ненагруженного рабочего органа показано пунктиром. Оно соответствует проектной ориентации его в предположении, что упругие смещения отсутствуют. Подошва рабочего органа в этом случае должна лежать в горизонтальной плоскости. Ориентация рабочего органа задаётся вектором ориентации Λ, расположенным в подошве рабочего органа.

Под действием силы сопротивления P_o стойка деформируется и рабочий орган получает упругие смещения, которые можно представить как смещение s носка лапы и поворота вектора ориентации на угол θ, из-за чего сила сопротивления P изменяется по величине и направлению. Новое положение рабочего органа при небольших углах поворота удобно характеризовать тремя углами поворота относительно осей координат. Эти углы имеют традиционные названия: θ_x - угол крена, θ_y - угол тангажа, θ_z - угол «рыскания». Они образуют вектор углов поворота $\theta = \{\theta x , \theta y , \theta z\}^T$

Смещения i–й точки рабочего органа:

$$s_i = s + [\Theta] L , \quad (1)$$

где L - радиус-вектор текущей точки рабочего органа относительно его носка; $[\Theta]$ - матрица вращений на угол θ.

Зависимость смещений от нагрузки $s_i(P)$ характеризует траектории точек и в общем случае нелинейна. Для нелинейных систем справедливы законы деформирования в приращениях:

$$ds = [\Delta] dP, \quad (2)$$

$$dP = [C] ds , \quad (3)$$

$$d\theta = [H] dP, \quad (4)$$

где $[\Delta]$ – симметричная матрица податливости размерности 3*3; $[C]=[\Delta]^{-1}$. – симметричная матрица жёсткости, размерности 3*3; [H] – матрица угловой податливости размерности 3*3, причем $h_{ii}=0$, i=1,2,3.

Нелинейности делают все эти матрицы зависимыми от нагрузки. Для определённости их необходимо определять в рабочей точки вблизи номинальной нагрузки $P_н$, при котором работает упругое крепление.

Направление приложения силы описывает вектор направляющих косинусов $n = \{n_1, n_2, n_3\}^T$, ($n_1 = \cos\psi_1$, $n_2 = \cos\psi_2$, $n_3 = \cos\psi_3$), т.е.

$$P = |P| n . \qquad (5)$$

Упругие смещения характеризуются величиной и направлением. Направление упругих смещений на практике характеризуют параметром $\lambda = s_X / s_Z$:

$$\lambda = (\delta_{12}\cos\psi_1 + \delta_{22}\cos\psi_2 + \delta_{23}\cos\psi_3)/(\delta_{11}\cos\psi_1 + \delta_{12}\cos\psi_2 + \delta_{13}\cos\psi_3). \qquad (6)$$

В зависимости от направления смещения носка лапы существуют три кинематические режима: с заглублением $\lambda > 0$, равновесный $\lambda = 0$ и с выглублением $\lambda < 0$. В отношении устойчивости хода по глубине предпочтительнее второй режим, не реагирующий на неоднородности почвенной структуры.

Упругие смещения рабочего органа искажают геометрию резания и вызывают отклонения глубины хода от заданной (см. рис.1). Для обеспечения агротребований упругая кинематика должна регламентироваться.

Агротехнические требования к кинематике упругих смещений рабочего органа сводятся к трём условиям:

1. Глубина хода носка рабочего органа при рабочей нагрузке должна соответствовать заданной, т.е вертикальные смещения его должны равняться нулю: $ds_Z = 0$.

2. Направление упругих смещений должно быть равно требуемому по технологии и энергосбережению, т.е.

$$\lambda = \lambda_{треб} . \qquad (7)$$

3. Вертикальные упругие смещения любых точек подошвы УЗРО не должны выходить за пределы агродопуска Ад:

$$\{s + [\Theta] L\}_z < Ад , \qquad (8)$$

где Θ – матрица вращений для углов $\theta = [H]P_н$; L – длина подошвы.

Методика математического моделирования. В общем случае система «рабочий орган – почва – крепление» является системой с распределёнными параметрами и распределённой нагрузкой и должна описываться трудноразрешимыми уравнениями в частных производных. Динамическую модель теории терраупругости целесообразно строить переходом на макроуровень через вектор состояния [4].

Вектор состояния системы «УРЗО-почва» включает векторы положения носка рабочего органа П, вектор углов поворота θ и их производные:

$$\Im = \{П; \theta; dП/dt; d\theta/dt\}. \qquad (9)$$

Сопротивление почвы описывает вектор F размерности n=6, включающий составляющие силы сопротивления P и момента M:

$$F = \{P ; M\} = \{Px, Py, Pz, Mx, My, Mz\}^T . \qquad (10)$$

Согласно положениям теории разрушения почв в земледельческой механике [1, с.118-120], факторами, от которых зависит сопротивление почвы, являются глубина обработки, скорость и геометрия рабочего органа, площадь сечения пласта, свойства почвенной среды (Горячкин В.П., Кацыгин В.В., Зеленин А.Н., Новиков Ю.Ф., Бурченко П.Н. и др.). Режимные факторы входят в вектор состояния $\Im$. Это означает, что для конкрет-

ной ситуации сопротивление почвы зависит от компонентов вектора состояния, являясь его вектор-функцией:

$$F = F[\Im] . \qquad (11)$$

В существующей теории резания крепление считается абсолютно жёстким, обеспечивающим постоянные значения вектора состояния, т.е. $\Im_o$= {П; 0; V; 0} = const. Новым подходом к построению модели взаимодействия рабочего органа с почвой в терраупругости является учёт изменений вектора состояния за счёт его упругих смещений, всегда возникающих под нагрузкой за счёт деформаций крепления.

Упругие смещения s и углы поворота θ УЗРО образуют 6-мерный вектор обобщенных координат УЗРО:

$$q = \{ s ; \Theta\} = \{ x, y, z, \theta x, \theta y, \theta z \}^T . \qquad (12)$$

Вектор U изменения состояния рабочего органа за счет упругих смещений размерности 2n:

$$U = \{ s; \theta; ds/dt; d\theta /dt \} . \qquad (13)$$

Результирующее значение вектора состояния

$$\Im = \Im o + U = \{ H+s; \theta; V+ ds/dt; d\theta /dt\} \qquad (14)$$

и сопротивление почвы движению рабочего органа зависит от упругих смещений:

$$F = F \{\Im o + U \}.$$

Использование вектора состояния позволяет при моделировании системы с распределёнными параметрами перейти на макроуровень. Разлагая формы упругих смещений по формам собственных колебаний основных частот и приводя силы и массы к носку рабочего органа, удалось свести задачу к матричному дифференциальному уравнению в форме Коши [4], в котором за фазовые координаты приняты изменения вектора состояния U:

$$Y U' = G U + R\{\Im\} + \rho(t), \qquad (15)$$

где G , Y - блочные матрицы собственных свойств упругой системы размерности 2n со структурой вида

$$G = \begin{vmatrix} E & 0 \\ -C & -B \end{vmatrix}, \qquad Y = \begin{vmatrix} E & 0 \\ 0 & A \end{vmatrix},$$

где A - диагональная матрица коэффициентов инерции; B- симметричная матрица коэффициентов диссипации; C- симметричная матрица коэффициентов жесткости; E, 0 - соответственно единичная и нулевая матрицы размерности n; $R\{\Im\}$ - нелинейная детерминированная вектор-функция реакции почвенной среды размерности 2n:

$$R\{\Im\} = R\{\Im o + U\} ; \qquad (16)$$

$\rho(t)$ - случайная составляющая реакции вследствие неоднородностей почвенной среды.

В структуре векторов реакции присутствуют векторы сопротивления почвы: детерминированная составляющая F и случайная f(t):

$$R\{\Im\} = [0; F \{\Im\}], \quad R\{\Im o + U\}=[0; F\{\Im o + U\}, \quad \rho(t)=[0; f(t)].$$

Число n обобщенных координат выбирается в зависимости от конкретной задачи. При отсутствии моментов M упругие прогибы консольного крепления пропорциональны углам поворота. Число независимых координат в этом случае n=3, и векторы обобщённых координат и сопротивления трёхмерны: $q=s=\{x, y, z\}^T$; $F=P=\{Px, Py, Pz\}^T$.

Система из уравнений (15) и (16) образует динамическую модель терраупругости. Первое уравнение системы описывает упругие смещения

рабочего органа, второе - энергетику технологического процесса по принципу "вход-выход".

Структура модели представлена на рис 2. В её основе лежит встречно-параллельное соединение двух звеньев: звена УЗРО, описываемого уравнением (15), и звена энергетики технологического процесса почвообработки, описываемого уравнением (16).

Как видно из схемы, упругость крепления образует обратную связь между выходом и входом модели. Наличие такой обратной связи является важной отличительной особенностью работы УЗРО, позволяющей объяснить все динамические эффекты процесса.

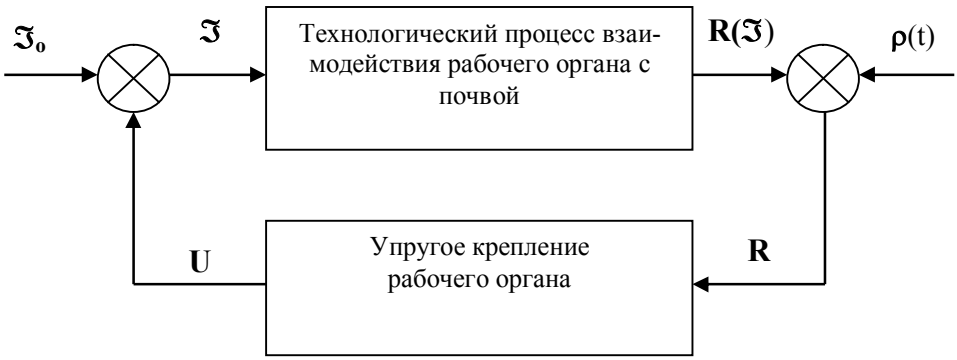


Рис 2. Структура модели терраупругости

Анализ модели. При анализе нелинейную вектор-функцию $R\{\mathfrak{I}\}$ подвергли статистической линеаризации. По правилам статистической линеаризации

$$R\{\mathfrak{I}\} = \underline{R}\{\mathfrak{I}\underline{o}\} + \underline{R_u} + [Q]\,u, \quad (17)$$

$$[Q] = [D_{uu}] * [D_{ru}], \quad (18)$$

$$d\underline{R_u} = [Q]\,d\underline{U}, \quad (19)$$

где $\underline{U}$ - вектор математического ожидания фазовых координат; u - центрированный вектор фазовых координат; [Q] - матрица коэффициентов статистической линеаризации порядка 2n

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Qs & Qv \end{bmatrix},$$

$[D_{uu}]$ - матрица коэффициентов корреляции фазовых координат; $[D_{ru}]$ - матрица взаимных коэффициентов корреляции упругой реакции и фазовых координат; $[Q_v]$, $[Q_s]$ - матрицы коэффициентов линеаризации порядка n; $\underline{R_u}$ - вектор средних значений нелинейной вектор-функции R{U}; по физическому смыслу - реакция системы на упругость.

Линеаризованные уравнения задачи включают динамическое уравнение колебаний "относительно среднего" и уравнение энергоэффекта "в среднем":

$$Y\,u' = \{[G] + [Q]\}\,u + \rho(t), \quad (20)$$

$$[G]\,\underline{U} + \underline{R}\{\mathfrak{I}_o\} + \underline{R_u} = 0. \quad (21)$$

Достоинством модели линеаризованной модели терраупругости является то, что каждое слагаемое имеет физический смысл: матрица [G] описывает свойства упругого крепления рабочего органа; матрица [Q] описывает упругие и вязкие свойства почвенной среды; по физическому

смыслу является матрицей квазиупругости почвенной среды; среднее значение реакции системы на упругость $\underline{R}_u$ характеризует энергоэффект УЗРО по отношению к жёсткому; $\underline{R}\{\underline{\Im o}\}$ - статическая характеристика жесткой системы, являющаяся традиционной задачей земледельческой механики о зависимости силы сопротивления от режимов резания.

Влияние упругости крепления рабочего органа на энергозатраты процесса почвообработки, определяемые средним значением реакции на упругость $\underline{R}_U$.возможно по выражениям (18), (19). Энергоэффект оказывается зависимым не только от средних значений упругого сопротивления $\underline{U}$, но и от их дисперсий D_{UU}, что свидетельствует о существовании виброэффекта.

Для практического использования уравнения модели (20), (21) могут приводиться к трёхмерной форме, в которой параметры модели имеют традиционный физический смысл:

$$[A]s'' +[B_1]s' +[C_1]s= p_B(t), \qquad (22)$$

где

$$[C_1] = [C] + [Q_S] , \ [B_1] = [B] - [Q_V] ;$$

$[C_1]$, $[C]$ - матрицы жесткости нагруженной и ненагруженной системы; $[B_1]$, $[B]$ - матрицы затухания нагруженной и ненагруженной системы; $[Q_V]$, $[Q_S]$ - матрицы вносимого затухания и квазижесткости почвы; $p_B(t)$ - внешняя возмущающая сила с нулевым математическим ожиданием ;

$$p_B(t) = p_A(t)+ p_Ш(t),$$

где $p_A(t)$ и $p_Ш(t)$ – соответственно периодическая и случайная составляющая возмущений; s, s′, s″ - центрированные значения соответственно вибросмещений, виброскорости и виброускорений.

Возможности модели. Модель терраупругости, более полно описывая характер движения рабочего органа в почвенной среде, позволяет выявить ряд динамических эффектов [5]: прецессию собственных частот при нагружении системы, существование неустойчивых режимов движения рабочего органа типа дивергенции и флаттера, появление автоколебаний, их взаимодействие с вынужденными, и, что особенно ценно для практики, влияние упругости крепления рабочего органа на энергозатраты процесса почвообработки.

Пример. Рассмотрим УЗРО культиватора в виде стрельчатой лапы. Симметрия нагружения позволяет ограничиться рассмотрением движения в продольно-вертикальной плоскости XOY с одним углом поворота θy – тангаж. Нагрузка на культиваторную лапу сводится к одной равнодействующей силе P, крутящий момент отсутствует. Вектор упругих смещений будет состоять из двух координат $s = [x, z]^T$.

Всё это позволяет решать плоскую задачу, ограничиваясь двумя уравнениями в приращениях:

$$\begin{aligned} a_{11}\, x'' + c_{11}x + c_{12}\, z &= \Delta P_x(x, z)+ p_{BX}(t), \\ a_{22}\, z ''+ c_{21}x + c_{22}\, z &= \Delta P_z(x, z)+ p_{BZ}(t). \end{aligned} \qquad (23)$$

По Горячкину В.П., тяговое сопротивление пропорционально площади сечения деформируемого пласта $S_П$:

$$P = (k + \varepsilon V^2)\, S_П \ , \qquad (24)$$

где k , ε – коэффициенты удельного сопротивления, зависящие от свойств почвы и геометрии резания.

Обозначив $(k + \varepsilon V^2)=K(V)$, получим $P = K(V)\, S_П$.

В свою очередь, площадь пласта и геометрия резания зависят от упругих смещений рабочего органа, тогда $K = K(x, z)$; $S_П = S_П(x, z)$ и сила сопротивления оказывается сложно зависимой от смещений x, z:

$$P(x, z) = K(x, z)\, S_П(x, z). \qquad (25)$$

Зададимся целью исследовать систему на устойчивость. Рассмотрим автономный режим, положив $p_{BX}(t)= p_{BZ}(t)=0$. При малых упругих смещениях (намного меньше глубины хода) нелинейностями вектор-функции $P(x, z)$ можно пренебречь, тогда приращение составляющих силы сопротивления ΔP будет линейной комбинацией от x, z :

$$\Delta P_x = к_{11}\, x + к_{12}\, z\,, \qquad (26)$$
$$\Delta P_x = к_{21}\, x + к_{22}\, z.$$

Подставляя эти выражения в уравнения (23) и пренебрегая силами демпфирования колебаний УЗРО в воздушной среде, получаем систему дифференциальных уравнений вида:

$$x'' + a_{11}x + a_{12}\, z = 0, \qquad (27)$$
$$z'' + a_{21}x + a_{22}\, z = 0.$$

где

$$a_{11} = (c_{11} - к_{11})/\, a_{11}\,;\; a_{12} = (c_{12} - к_{21})/\, a_{11}\,;$$
$$a_{21} = (c_{21} - к_{21})/\, a_{22}\,;\; a_{22} = (c_{22} - к_{22})/\, a_{22}.$$

Полученные уравнения - полный аналог классической модели флаттера в упрощённой форме по Пановко Я.Г. [7, с.334]. Такое совпадение моделей носит принципиальный характер и свидетельствует о физическом родстве процессов аэроупругости и терраупругости и обоснованности постановки задач терраупругости в почвообработке.

Анализ корней характеристического уравнения системы (27) даёт два условия устойчивости [7, с.335]:

$$a_{11}\, a_{22} - a_{12}\, a_{21} \le (a_{11} + a_{22})^2 /4, \qquad (28.1)$$
$$a_{11}\, a_{22} - a_{12}\, a_{21} \ge 0. \qquad (28.2)$$

Невыполнение первого условия, по Пановко Я.Г., приводит к дивергенции, а невыполнение второго – к флаттеру [7, с.335].

Поскольку входящие в условия величины a_{ik} включают в себя значения c_{ik} i, k = 1, 2, то добиться соблюдения условий (28) устойчивой работы УЗРО возможно только варьированием элементов матрицы жёсткости [C] , особенно её недиагональных элементов, характеризующих межкоординатные связи и кинематический режим работы крепления.

Поиск периодических решений и энергоэффекта требует учёта нелинейностей функции P(x, z) по выражению (25). Аналитическое её определение для практики имеет определённые трудности.

Целесообразнее получать P(x, z) экспериментально. При этом следует учесть, что отношение $z/x = \lambda$ характеризует направление упругих смещений, и зависимость P(x, z) можно толковать как зависимость от кинематического режима $P(x, \lambda)$. При горизонтальной силе сопротивления на-

правляющие косинусы (5) $n_1 = 1$, $n_2 = n_3 = 0$ и по выражению (6) показатель $\lambda = \delta_{12} / \delta_{11} = - c_{12} / c_{11}$. Экспериментально изучена регрессионная модель вида:

$$P = f(\lambda, c_{11}). \qquad (29)$$

Получено регрессионное уравнение зависимости тягового сопротивления от кинематического режима и жёсткости:

$$P = 68 + 8{,}0x_1 - 7{,}16x_1^2 + 2{,}5x_2x_1 - 2{,}8x_1^2x_2 , \qquad (30)$$

где $x_3 = 0{,}19\lambda$; $x_4 = (c_{11} - 45)/20$.

На рис.3 показаны зависимости $P(\lambda)$ для упругих подвесок разной жесткости: ♦ - c_{11} = 25 Н/мм, • - c_{11} = 45 Н/мм и Δ - c_{11} = 65 Н/мм, при скорости движения V=12 км / ч, и глубине обработки H =11 см.

Важнейшим обстоятельством является наличие минимума силы сопротивления вблизи нулевого кинематического режима. Минимум силы сопротивления наблюдается при значениях кинематического показателя λ_1= (-0;05)-(-0,1). Эти значения соответствуют слабому режиму с выглублением.

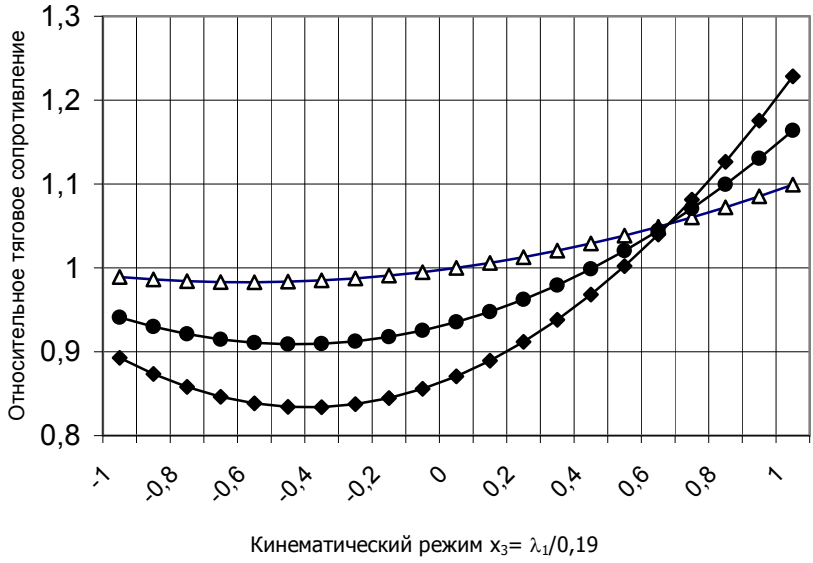


Рис.3. Зависимость тягового сопротивления
от кинематического режима при различной жёсткости

Степень значимости оптимизации кинематического показателя λ характеризуется крутизной нарастания функции вблизи оптимума. Из графиков видно (рис.3), что изменение показателя кинематического режима от 0 до 1,19 (усиление режима заглубления) вызывает значительное увеличение тягового сопротивления от 10 до 45% в зависимости от жёсткости крепления. Если учесть, что для почвообработки существенным является снижение и на 5-10%, то отмеченные изменения говорят о высокой чувствительности тягового сопротивления к изменению кинематики упругих

смещений и достаточно высокой эффективности способа энергосбережения за счёт её оптимизации. Чувствительным к кинематике упругих смещений оказывается и режим выглубления: изменение кинематического режима на 0,09 вызывает потери энергосбережения на 5 %.

Таким образом, регрессионный анализ экспериментальных данных отчётливо подтверждает оптимизационность задачи: существование минимума тягового сопротивления при изменении упругой кинематики и высокую чувствительность энергетики процесса почвообработки к изменению кинематики упругих смещений, а значит, и потенциально высокую эффективность способа энергосбережения за счёт её оптимизации.

Выводы. Предлагаемая динамическая модель терраупругости отражает все особенности задачи взаимодействия рабочего органа с почвой (многомерность, нелинейность, автоколебательность), пригодна для различных почвенных сред и различных рабочих органов; большинство существующих энергетических моделей почвообработки является её частными случаями.

Применяемый для описания модели математический аппарат в виде матричных линеаризованных дифференциальных уравнений вводит её в русло современных достижений аналитической механики и, следовательно, может опираться на её развитое компьютерное программное обеспечение. Разработанная модель терраупругости в состоянии описать сложные динамические эффекты, сопровождающие движение УЗРО в почвенной среде: появление неустойчивых режимов, автоколебания, прецессию собственных частот и траекторий, вибро- и энергоэффект.

Теория терраупругости позволила разработать практические рекомендации, ряд которых положен в основу отраслевых методических указаний МУ 23.2.48-89, разработанных с НПО ВИСХОМ [6]. Они включают предложения, методики и алгоритмы по измерениям, расчётам, идентификации и оптимизации упругих смещений рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Библиографический список

1. Машиностроение: энциклопедия под ред. К.В.Фролов и др. – М.: Машиностроение. Т. 1V-16. СХМ и оборудование, 1998. – 578 с.

2. *Игнатенко И.В.* Экспериментальные исследования динамики работы упругой подвески рабочих органов культиваторов / И.В. Игнатенко, С.В. Левицкий // Комплексная механизация и автоматизация сельскохозяйственного производства. – Ростов н/Д, 1979. – С.141-149.

3. *Поветьев А.И.* О нормировании упругих смещений рабочих органов культиватора / А.И. Поветьев, В.И.Гасилин, Н.А. Китаев, И.В. Игнатенко // Параметры перспективных почвообрабатывающих рабочих органов и машин: тр. ВИМ. – М., 1981. – Т. 90. – С.45-51.

4. *Игнатенко И.В.* Динамическая модель взаимодействия упругозакреплённого рабочего органа с почвой // Научная мысль Кавказа. – 2002. – №14. – С.90-98.

5. *Игнатенко И.В.* Энергетические аспекты взаимодействия упругозакреплённого рабочего органа с почвой в земледельческой механике: монография / И.В. Игнатенко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2002. – 160 с.

6. *Инаекян С.А.* Определение и расчёт параметров упругих стоек рабочих органов почвообрабатывающих машин: метод. указ. / С.А. Инаекян, И.В. Игнатенко, А.А. Завражнов, В.П. Жаров. – М.: ВИСХОМ, 1990. – 60 с.

7. *Пановко Я.Г.* Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, ошибки и парадоксы / Я.Г. Пановко, И.И.Губанова. – М.: Наука, Физматгиз, 1979. – 384 с.

Материал поступил в редакцию 26.02.08.

I.V. IGNATENKO

TERRAELASTICITY PROBLEM IN AGRICULTURAL.

The problem of mathematical description of the moving process of a labour body in the soil with allowance for fastening elasticity is being soloed now. The analogy with the problems of aero and hidroelasticity is being established now. A model in the form of Coshy has been obtained; drag force depends on elastic shift.

ИГНАТЕНКО Иван Васильевич (р.1941), профессор кафедры «Сельскохозяйственные машины» Донского государственного технического университета, доктор технических наук (2003). Окончил РИСХМ (1963).
Научные интересы связаны с конструированием и расчётом зерноперерабатывающей и почвообрабатывающей техники.
Автор свыше 70 научных статей, 10 а.с. на изобретение и 8 учебных пособий.

УДК 007:631.2

А.К. ТУГЕНГОЛЬД, В.П. ДИМИТРОВ, Л.В. БОРИСОВА

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРОДУКЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ МАШИН

Рассматривается структура и взаимосвязи подсистем экспертной системы для технологической регулировки зерноуборочного комбайна. Описываются режимы работы экспертной системы и различные аспекты представления знаний.
Ключевые слова: *нечеткие экспертные знания, экспертная система, технологическая регулировка, зерноуборочный комбайн, лингвистическая переменная.*

Введение. Проблема повышения эффективности сельхозпроизводства во многом связана с качеством функционирования сельскохозяйственной техники, оказывающей решающее влияние на достижение результата и расход ресурсов при проведении уборочных работ [1]. Задача принятия решений при технологической регулировке машины является одной из важнейших: от правильного ее решения зависят эффективность и результативность технологического процесса уборки. Вместе с тем эта задача относится к классу трудноформализуемых [2, 3]. В основном управление технологическим процессом комбайновой уборки возлагается на оператора. Трудности с решением задачи технологической регулировки связаны с неопределенностью информации о показателях качества работы комбайна, факторах внешней среды, в которой функционирует зерноуборочный комбайн, регулируемых параметрах машины, а также сложностью и недостаточной изученностью взаимосвязей между указанными признаками.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности функционирования уборочных машин является разработка систем информационной поддержки (экспертных систем) интеллектуальной деятельности оператора при управлении комбайном.

Специфика задач принятия решений при функционировании зерноуборочных комбайнов состоит в следующем.

1. Для рассматриваемой технической системы адекватное математическое описание процесса принятия решений (ПР) при управлении технологическим процессом в настоящее время отсутствует. Приспособленность зерноуборочных комбайнов к регулировке недостаточна. Попрежнему преобладают органолептические методы диагностирования.

2. Наиболее сложным видом деятельности человека в системе «оператор-комбайн-внешняя среда» является принятие решений. При этом информационная нагрузка на оператора в значительной степени обуславливает производительность и качество работы данной системы. Задачи технологической регулировки рабочих органов комбайна являются достаточно трудными, и их оптимальное решение требует высококвалифицированных специалистов (экспертов), количество которых не соответствует практическим потребностям.

3. Имеющиеся аналитические и корреляционно-регрессионные модели представляют собой достаточно громоздкие математические конст-

рукции, и их использование в реальном времени и в сложных практических условиях затруднено.

Архитектура и режимы работы экспертной системы. Особенности предметной области определили архитектуру экспертной системы и ее место во взаимодействии с человекомашинной системой (рис.1). Для удобства рассмотрения и анализа выделены укрупненные блоки: ЭС, ИО, АТС, ЧМС, ВС.

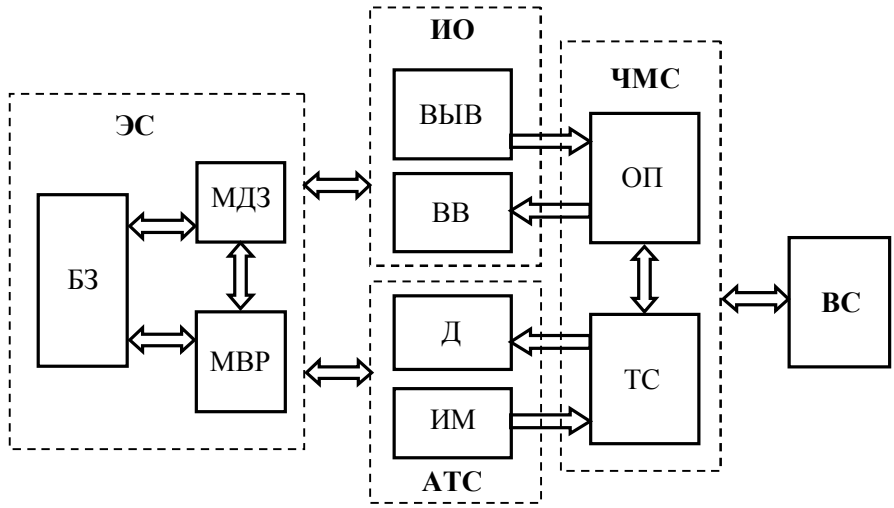


Рис.1. Многоуровневая структура использования экспертной системы: ЭС – экспертная система; БЗ – база знаний; МДЗ – модуль дополнения знаний; МВР – модуль вывода решений (механизм вывода); ИО – интерфейс оператора (лица, принимающего решения – ЛПР); ВЫВ – средства вывода информации; ВВ – средства ввода информации; АТС – адаптер технической системы; Д – датчики; ИМ – исполнительные механизмы; ЧМС – человекомашинная система; ОП – оператор (ЛПР); ТС – техническая система (комбайн); ВС – внешняя среда

Традиционными компонентами ЭС являются база знаний, модуль вывода решений («машина вывода»), модуль дополнения знаний, интерфейс оператора. Для управления техническим состоянием и функционированием машины (технической системы) рассматриваются дополнительные модули: Д – чувствительные элементы (датчики) и ИМ – исполнительные механизмы, которые условно объединены в модуль АТС – адаптер технической системы. Модуль Д предназначен для получения значений выходных характеристик ТС и значений факторов ВС. Для выдачи корректирующих воздействий на ТС предусмотрен модуль ИМ.

Характер взаимодействия модулей ОП – ИО в основном аналогичен взаимодействию модулей ТС – АТС. Модуль ИО включает средства ввода и вывода необходимой информации для оператора. И в том и в другом случае имеются замыкающиеся через ЭС контуры: ОП →ВВ →ЭС→ ВЫВ→ ОП; ТС→ Д→ ЭС→ ИМ→ ТС.

Модуль МДЗ предназначен для выполнения стандартных функций: дополнения, удаления, редактирования знаний. Модуль МВР предназначен для реализации стратегий управления (использования) знаниями и выработке решений (корректирующих действий). Оба контура обеспечивают

процессы выявления и обработки информации о состоянии факторов уборки, параметров технического состояния, регулируемых параметров и показателей качества, а также выработки управляющих воздействий.

В зависимости от возможности практической реализации рассматриваемой архитектуры экспертной системы могут использоваться контуры:

$$ВС \rightarrow ОП \rightarrow ТС \rightarrow ВС, \quad (1)$$

$$ВС \rightarrow ОП \rightarrow ЭС \rightarrow ОП \rightarrow ТС \rightarrow ВС, \quad (2)$$

$$ВС \rightarrow ТС \rightarrow АТС \rightarrow ЭС \rightarrow АТС \rightarrow ТС \rightarrow ВС. \quad (3)$$

Контур (1) соответствует традиционному режиму управления машиной (ТС), то есть без использования экспертной системы.

Контур (2) соответствует режиму «советчика» оператору. В этом режиме ЭС выступает как система поддержки принятия решений. В базе знаний аккумулированы многочисленные стандартные решения практических задач, а оператор выполняет функции АТС. В этом случае решения, формулируемые ЭС по управлению техническим состоянием или технологическим процессом, носят рекомендательный характер. Оператор учитывает рекомендации экспертной системы, но самостоятельно обеспечивает работоспособность и функционирование ЧМС: принимает решения по выработке управляющих воздействий (с привлечением дополнительной информации и здравого смысла) и осуществляет эти действия. Оператор выполняет функции интеллектуального звена в системе управления ЧМС, и ЭС служит для снижения информационной нагрузки на оператора, так как эта нагрузка велика из-за сложности конструкции машины, насыщения ее электроникой, гидравликой, а также сложных (разнообразных) условий уборки.

Контур (3) соответствует автоматическому режиму работы ТС.

В данной статье мы не рассматриваем контуры (1) и (3) из-за их характерных особенностей, а более подробно проанализируем использование контура (2). Для обеспечения эффективного функционирования ЧМС целесообразно выделить подпроцессы работы ЭС: НЗ – наполнение знаниями; АД – адаптация; АН – автономная настройка; СРР – советующий режим работы; АРР – автоматический режим работы (рис.2).

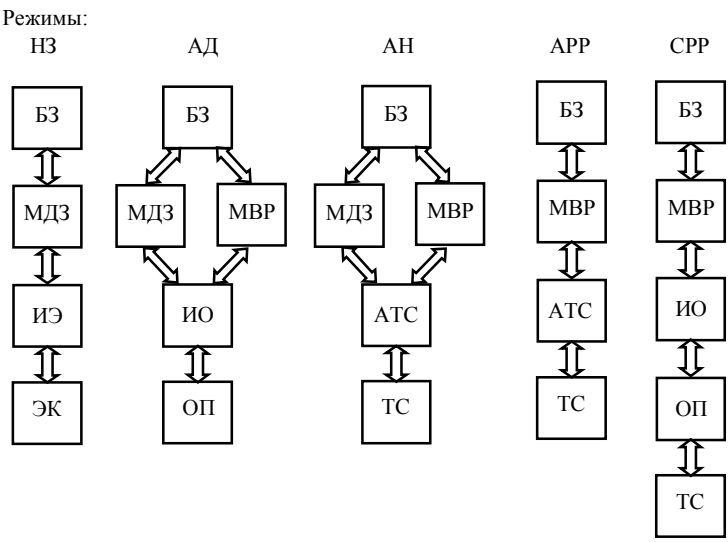


Рис.2. Режимы работы экспертной системы

Режим НЗ соответствует формированию (заполнению) базы знаний экспертной системы с «нуля» и осуществляется предметными экспертами (совместно с инженером знаний с помощью ИЭ – интерфейса эксперта). В данном случае допускаем, что оператор использует коммерческий вариант экспертной системы с сформированной базой знаний.

Режим АД соответствует корректировке базы знаний оператором (ЛПР) в период эксплуатации (корректировка «под себя»). Такая корректировка необходима при изменении внешних условий (например, изменения в конструкции машины), появлению описания новых стандартных решений уникальных задач (например, уборка зерновых в условиях повышенной влажности).

Режим СРР соответствует отлаженному состоянию при штатной эксплуатации экспертной системы. Особенностью рассматриваемой предметной области является то обстоятельство, что в связи объективными условиями изменчивости условий уборки задачи технологической настройки и корректировки технологических регулировок необходимо решать минимум 2-4 раза в течение одного дня [1].

При реализации интегрированной системы автоматического управления комбайном в режиме АРР автоматически решаются рассматриваемые задачи при штатной эксплуатации ТС (проведении уборочных работ).

Представление нечетких знаний. Представление знаний предметной области есть описание в рамках определенной модели признаков и отношений между ними. Ранее нами была показана целесообразность использования лингвистического описания нечетких экспертных знаний [4, 5]. Для сужения области анализа проблемы рассмотрим семантические пространства факторов внешней среды (условий уборки) и регулируемых параметров машины в задаче технологической настройки комбайна.

В базе знаний экспертные знания хранятся в виде лингвистических переменных (ЛП) и наборов так называемых решающих правил. Лингвистические переменные содержат наборы описания рассматриваемых семантических пространств. Решающие правила осуществляют логический вывод на основе композиции заложенных в базе знаний высказываний.

Факторы внешней среды и регулируемые параметры описываются ЛП, каждая из которых состоит из термов:

$$A_i:\{a_{i1},\ldots, a_{i2},\ldots, a_{ip},\ldots, a_{ik}\}, \quad (4)$$

$$B_i:\{b_{j1},\ldots, b_{j2},\ldots, b_{jp},\ldots, b_{jk}\}. \quad (5)$$

В выражениях (4), (5) первый индекс – номер признака, второй – номер терма. Термы представляют собой наборы значений (профили) функций принадлежности (ФП), определенных на множествах значений соответствующих признаков и принимающие значения на интервале [0,1]:

$$a_{ip} = \mu_{ip}(A_i),$$

$$b_{jq} = \mu_{jq}(B_j); \qquad \mu_{ip}(A_i), \mu_{jq}(B_j) \in [0,1].$$

Профили ФП представляют собой часть экспертных знаний и хранятся в базе знаний. Конфигурация профилей функций принадлежности строятся разработчиком (инженером знаний) экспертной системы на основе результатов взаимодействия с экспертом. При этом могут использоваться различные подходы: интервьюирование одного эксперта-человека (метод деления функции принадлежности пополам), использование метода

экспертной оценки (учитываются суждения нескольких экспертов), косвенный метод построения функции принадлежности (метод анализа иерархий) и др. Важным является то обстоятельство, чтобы профили имели унифицированный вид, т.е. характеризовались фиксированным набором параметров *p*. В нашем случае для описания крайнего левого терма используется выражение (6), для центральных термов – (7), для крайнего правого – (8) [6, 7]:

$$\mu\ (x,a,b) = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad x \le a \\ \dfrac{b-x}{b-a}, & \text{если} \quad a < x < b \\ 0, & \text{если} \quad x \ge b \end{cases} \tag{6}$$

$$\mu\ (x,a,b,c) = \begin{cases} 0, & \text{если} \quad x \le a \\ \dfrac{x-a}{c-a}, & \text{если} \quad a < x \le c \\ \dfrac{b-x}{b-c}, & \text{если} \quad c < x < b \\ 0, & \text{если} \quad x \ge b \end{cases} \tag{7}$$

$$\mu\ (x,a,b) = \begin{cases} 0, & \text{если} \quad x \le a \\ \dfrac{x-a}{b-a}, & \text{если} \quad a < x < b \\ 1, & \text{если} \quad x \ge b. \end{cases} \tag{8}$$

Терм-множества рассматриваемых ЛП переменных удовлетворяют необходимым условиям [6]. Предполагается использование нормальных нечетких множеств с высотой d = 1. Ранее нами было показано, что достаточно рассматривать не более трех термов, как для факторов внешней среды, так и для регулируемых параметров машины [8].

Отношения между входными и выходными признаками (факторами внешней среды, параметрами технического состояния и регулируемыми параметрами машины) описываются в виде системы высказываний и содержатся в базе знаний в виде системы решающих правил (РП).

Специфика изучаемой предметной области предполагает применение систем нечетких высказываний типа [9]:

$$\tilde{L}^{(1)} = \begin{cases} \tilde{L}_1^{(1)} : < \textit{если} \quad \tilde{E}_{11}, \quad \textit{то} \quad \tilde{B}_1 >, \\ \tilde{L}_2^{(1)} : < \textit{если} \quad \tilde{E}_{21}, \quad \textit{то} \quad \tilde{B}_2 >, \\ \tilde{L}_3^{(1)} : < \textit{если} \quad \tilde{E}_{31}, \quad \textit{то} \quad \tilde{B}_3 >, \\ \ldots \end{cases}. \tag{9}$$

E_{ji}, $i = \overline{1, n_j}$, $j = \overline{1, m}$ – высказывания вида

$$< \beta_X \ \ \textit{есть} \ \ \alpha_{X_{ji}} \ И \ \ \beta_Y \ \ \textit{есть} \ \ \alpha_{Y_{ji}} \ И \ldots И \ \beta_Z \ \ \textit{есть} \ \ \alpha_{Z_{ji}} > .$$

где x, y, z и т.д. – факторы внешней среды; m – число базовых значений выходной лингвистической переменной.

Высказывание E_{ji} представляет собой i-ю входную нечеткую ситуацию, которая может иметь место, если лингвистическая переменная β_V примет значение α_{Vj}. Значения α_{Xji}, α_{Yji}, α_{Zji}, …, α_{Vj} – нечеткие переменные.

Нечеткие высказывания соответствуют общей форме

$$\tilde{A}_j :< \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_j} > \quad и \quad \tilde{B}_j :< \beta_V \quad есть \quad \alpha_{V_j} > \tag{10}$$

и выглядят для описания лингвистической переменной одного из регулируемых параметров, например, «частота вращения молотильного барабана»: {пониженная, номинальная, повышенная}, следующим образом:

$$\tilde{A}_1 :< \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_1} или \quad \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_3} или \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_8}$$
$$или \quad \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_{10}} >$$

$$\tilde{A}_2 :< \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_2} или \quad \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_4} или \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_9} >$$

$$\tilde{A}_3 :< \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_5} или \quad \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_6} или \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_7}$$
$$или \quad \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_{11}} или \quad \beta_W \quad есть \quad \alpha_{W_{12}} >$$

$$\tilde{B}_1 :< \beta_V \quad есть \quad \alpha_{V_1} >$$

$$\tilde{B}_2 :< \beta_V \quad есть \quad \alpha_{V_2} >$$

$$\tilde{B}_3 :< \beta_V \quad есть \quad \alpha_{V_3} >,$$

где $\alpha_{V_1}, \alpha_{V_2}, \alpha_{V_3}$ – соответствующие значения термов выходной лингвистической переменной.

В этом случае система нечетких высказываний имеет вид:

$$\tilde{L}^{(1)} = \begin{cases} \tilde{L}_1^{(1)} : < если \quad \tilde{A}_1, \quad то \quad B_1 > \\ \tilde{L}_2^{(1)} : < если \quad \tilde{A}_2, \quad то \quad B_2 > \\ \tilde{L}_3^{(1)} : < если \quad \tilde{A}_3, \quad то \quad B_3 > . \end{cases} \tag{11}$$

Система нечетких высказываний лингвистически неизбыточна при выполнении условия:

$$(\forall i, j \in \overline{1,m})[\tilde{A} \& \tilde{B} = \tilde{B} \rightarrow i = j].$$

Если β_W и β_V – входная и выходная лингвистические переменные процесса принятия решения с множеством базовых значений T_W и T_V, то система нечетких высказываний является лингвистически полной при выполнении условия [9]

$$(\forall \alpha_W \in T_W)[\exists i \in \overline{1,m}) \mid \tilde{L}_i^{(1)} :$$
$$< ЕСЛИ \quad \tilde{A}_i \quad ТО \quad \tilde{B}_i > \& \tilde{A}_i :< \beta_W \quad есть \quad \alpha_W >],$$

в противном случае система является лингвистически вырожденной.

Система нечетких высказываний является лингвистически непротиворечивой при выполнении условия:

$$(\forall i, j \in \overline{1,m})[\tilde{A}_i = \tilde{A}_j \rightarrow \tilde{B}_i = \tilde{B}_j].$$

Если T ($\tilde{L}_i$ / $\tilde{L}_j$), i = 1, m, истинность высказывания $\tilde{L}_i$ относительно $\tilde{L}_j$, то непротиворечивостью нечеткой системы L является величина T_L, определяемая выражением [9]:

$$T_L = \underset{i=\overline{1,m}}{\&} \underset{j=\overline{1,m}}{\&} T(\tilde{L}_i / \tilde{L}_j), \quad i \neq j.$$

Формально эта величина будет иметь вид

$$T_L = \{< \mu_{TL}(\tau), \tau >\},$$

$$(\forall \tau \in [0,1])[\mu_T(\tau) = \min_{i,j=\overline{1,m}} \mu_{T_{ij}}(\tau).$$

,

где m – число высказываний в системе $\tilde{L}$; $|T_V|$ – число базовых значений выходной лингвистической переменной T_V (число выходных нечетких ситуаций); $\mu_{Tij}(\tau)$ – функция принадлежности степени истинности высказывания L_i относительно $\tilde{L}_j$, отражающая количественную меру соответствия, в то время как лингвистическая непротиворечивость определяет качественную меру соответствия нечетких экспертных высказываний относительно друг друга.

Рассматриваемая система (11) лингвистически полная, неизбыточная, невырожденная и непротиворечивая нечеткая система экспертных высказываний, и для нее справедливо равенство $|T_V|$ = m.

Экспертные высказывания, отражающие нечеткие ситуации и характеризующие возможные состояния регулируемого параметра, например, частоты вращения молотильного барабана, а именно ситуации пониженной, номинальной и повышенной частоты вращения (обозначены соответственно индексами 1, 2, и 3) в лингвистическом и символьном выражении имеют вид (фрагмент):

$E_{1.3}$:<β_X есть α_{X1} и β_Z есть α_{Z1} и β_Y есть α_{Y1} и β_Q есть α_{Q2}>

$E_{1.3}$: ЕСЛИ урожайность «менее 30» И засоренность «малая»

И соломистость «нормальная» И влажность хлебостоя «сухой».

Видно, что для полного описания-указания реакции ЭС при всех возможных комбинациях термов входных переменных требуется не более mk^n решающих правил.

Как отмечалось выше, ЭС с фиксированным набором знаний реализует функции СППР. При этом режим НЗ вынесен в этап разработки. Именно на этом этапе проектирования ЭС определяются лингвистические переменные и их профили, формулируются решающие правила. В данной работе вопрос функционирования режима НЗ без участия эксперта не рассматривается ввиду его сложности реализации.

Кроме СРР нечеткая алгоритмическая часть имеется в режиме АД, который включает корректировку экспертных знаний с участием оператора (ЛПР). В режиме автоматической подстройки предполагается автоматическое согласование корректировки с ранее полученными знаниями. В этом случае интерфейс оператора должен быть организован таким образом, чтобы понятия, с которыми работает оператор, были сформулированы в

терминах предметной области. Рассмотрим некоторые аспекты организации режима АД, для случая корректировки ЛП, удовлетворяющих рассматриваемому требованию.

Каждый терм ЛП (значений ЛП) представляет собой профили функции принадлежности, имеющие унифицированный вид (выражения (6)-(8)) и характеризующиеся набором параметров p. Тогда полагаем, что имеется (m+n)kp-параметров, полностью описывающих набор лингвистических переменных предметной области.

Традиционная последовательная схема программной реализации нечетких операций предполагает хранение значений ФП в виде массивов чисел. Процедура обработки включает поэлементный перебор массивов.

Заключение. Ключевое преимущество построения экспертной системы на основе логико-лингвистического представления нечетких экспертных знаний заключается в компактном и адекватном представлении реальных ситуаций функционирования уборочных машин. На основе единого формализма имеется возможность учета количественных и лингвистических признаков внешней среды, параметров технического состояния и регулируемых параметров машины.

На программные системы и базы данных по предварительной настройке и корректировке технологических регулировок зерноуборочных комбайнов получено 7 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ и баз данных в Роспатенте. Применение исследовательского прототипа экспертной системы в полевых условиях позволяет решать задачу управления технологическим процессом при наличии операторов низкой квалификации с учетом меняющихся факторов внешней среды, а также способствует снижению времени на технологическую регулировку в 2-5 раз по сравнению с традиционными методами.

Библиографический список

1. *Пугачев А.Н.* Советы комбайнеру / А.Н.Пугачев. – М.: Колос, 1984. – 224 с.

2. *Борисова Л.В.* Методика моделирования предметной области «технологическая настройка» в нечеткой постановке / Л.В.Борисова //Доклады РАСХН. – 2005. – №6. – С. 62-65.

3. *Тугенгольд А.К.* Интеллектуальное управление технологическими объектами /А.К. Тугенгольд // Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. Сер. Техн. науки. – 2005. – С. 50-54.

4. *Димитров В.П.* Теоретические и прикладные аспекты разработки экспертных систем для технического обслуживания машин/ В.П.Димитров, Л.В.Борисова. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. – 2007. – 202 с.

5. *Димитров В.П.* Нечеткие модели в задачах технологической регулировки машин/ В.П.Димитров, Л.В.Борисова. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. – 224 с.

6. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун, В.Б. Силов, В.Б. Тарасов; под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.

7. *Борисова Л.В.* Особенности формализации знаний при логико-лингвистическом описании сложных технических систем / Л.В. Борисова, В.П.Димитров / РГАСХМ. – Ростов н/Д. – 2006. – 234 с.

8. *Димитров В.П.* Выбор оптимального числа термов лингвистической переменной / В.П.Димитров, Л.В.Борисова // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: тр. Всерос. конф. – Воронеж: ГОУВПО ВГТУ, 2007. – С. 118-122.

9. *Малышев Н.Г.* Нечеткие модели для экспертных систем в САПР / Н.Г.Малышев, Л.С.Берштейн, А.В.Боженюк. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 136 с.

Материал поступил в редакцию 08.07.08.

A.K. TUGENGOLD, V.P. DIMITROV, L.V. BORISOVA

TO THE QUESTION OF FUZZY EXPERT SYSTEM CONSTRUCTING PRODUCTION TYPE FOR TECHNOLOGICAL ADJUSTMENT OF MACHINES

The structure and interrelations of subsystems of expert system for of a combine's harvester technological adjustment is considered. expert system's operating modes and various aspects of representation of knowledge are described.

ТУГЕНГОЛЬД Андрей Кириллович (р.1937), доктор технических наук (1983), профессор ДГТУ. Окончил РИСХМ (1960).
Сфера научных интересов: интеллектуальное управление технологическими системами, динамика и точность мехатронных систем.
Автор более 200 научных работ, в том числе 18 учебных пособий и монографий.

ДИМИТРОВ Валерий Петрович (р.1953), доктор технических наук (2002), профессор ДГТУ. Окончил РИСХМ (1975).
Сфера научных интересов: системы информационного обеспечения жизненного цикла продукции, экспертные системы, техническое обслуживание машин.
Имеет 307 научных публикаций, в том числе 27 учебных пособий и монографий.

БОРИСОВА Людмила Викторовна, доктор технических наук (2008), профессор. Окончила РГАСХМ (1991).
Сфера научных интересов: статистика, системы информационного обеспечения жизненного цикла продукции, менеджмент качества.
Автор 175 научных работ, в том числе 11 учебных пособий и монографий.

УДК 631.354

А.А.ЛЯШЕНКО, О.Н.КОСИЛОВ

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ХЛЕБНОЙ МАССЫ ПРИ ЕЕ ДВИЖЕНИИ В МОЛОТИЛЬНОМ ЗАЗОРЕ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Приведена методика и результаты исследования скорости движения и размеров порций хлебной массы на основании записей осциллограмм усилий сжатия движущегося в молотильном зазоре хлебного потока.
Ключевые слова: *зерноуборочный комбайн, молотильный аппарат, скорость движения, размеры порций, хлебный поток, усилия сжатия.*

Введение. Важнейшим рабочим органом зерноуборочного комбайна является молотильное устройство, качество работы которого определяет величину недомолота, дробления, состав и объем мелкого вороха, поступающего на очистку, количество зерна, поступающего на соломотряс, т.е. работа молотильного аппарата, определяет во многом качество работы всего комбайна. Поэтому исследование процессов, протекающих в молотильном зазоре, позволит наметить пути совершенствования работы молотильного устройства.

Постановка задачи. Одним из направлений в изучении процессов, протекающих в молотильном зазоре, является измерение в нем усилий сжатия хлебного слоя. По величине усилий сжатия, величине молотильных зазоров и физико-механических свойств хлебной массы можно судить о толщине движущегося слоя и других параметрах потока [1]. По предлагаемой в статье методике можно определять скорость движения хлебного потока, его длину и толщину, время нахождения в молотильном зазоре по записям усилий сжатия в различных зонах подбарабанья без предварительного изучения физико-механических свойств хлебной массы и получения законов сжатия.

Методы исследований. Методика исследования заключалась в том, что хлебная масса, равномерным слоем уложенная на ленту катушки длиной 30 м со скоростью подачи 1,6 м/с, подавалась на подборщик и далее в рабочие органы зерноуборочного комбайна СК-5 «Нива». Масса обмолоченного продукта составляла G = 85 кг, подача q = 4,52 кг/с. В начале и конце наклонной камеры устанавливали специальные тензометрические датчики, с помощью которых записывали на ленту осциллографа усилия сжатия проходящей над ними хлебной массы. Подобные датчики усилий сжатия хлебного потока устанавливали на входе, в середине и на выходе подбарабанья (рис.1). Запись усилий сжатия от всех датчиков проводили на ленту осциллографа со скоростью протяжки 100 мм/с.

На полученных записях усилий сжатия (рис.2) видно, что сжатие хлебной массы в наклонной камере и молотильном зазоре происходит не постоянно, а чередуется с участками, на которых усилия сжатия равно нулю, то есть хлебная масса движется отдельными порциями, а не сплошным потоком. Величина этих порций не одинаковая как по длине, так и по толщине. Видно также, что порции хлебной массы, зафиксированные в начале

наклонной камеры, сохраняются в конце её и далее на входе, в середине и выходе из подбарабанья.

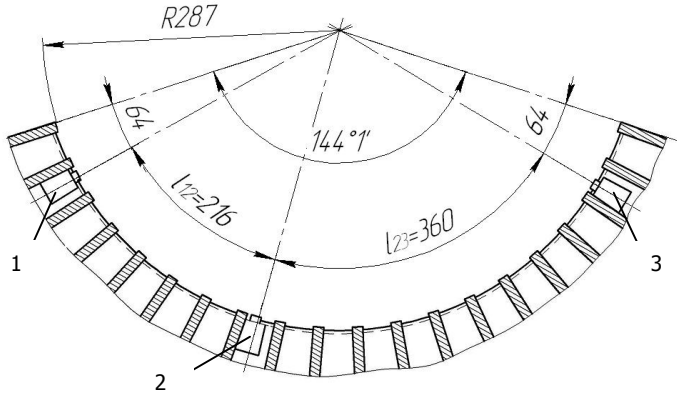


Рис.1. Схема расположения датчиков для записи усилий сжатия в подбарабанье: 1 – на входе; 2 – в середине; 3 – на выходе подбарабанья

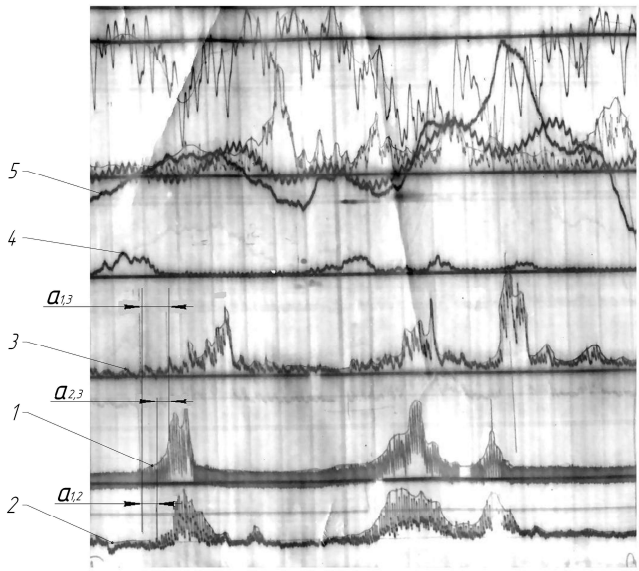


Рис.2. Осциллограмма записи усилий сжатия хлебного потока в молотильном зазоре (1,2,3) и наклонной камере (4 и 5)

Результаты эксперимента и их обсуждение. Зная расстояние между датчиками усилий сжатия (рис.1), скорость протяжки ленты осциллографа (100 мм/с) и имея запись усилий сжатия в различных зонах подбарабанья, были рассчитаны время движения отдельных порций от датчика до датчика (t_{12}, t_{23}, t_{13}), скорость прохождения порциями расстояний между датчиками (V_{12}, V_{23}, V_{13}) (см. таблицу), средняя скорость на участках между датчиками.

Результаты обработки осциллограммы

Номер порции	Расстояние, мм			Время, с			Скорость, м/с		
	a_{12}	a_{23}	a_{13}	t_{12}	t_{23}	t_{13}	V_{12}	V_{23}	V_{13}
1	4,3	3,2	7,5	0,043	0,032	0,075	5,1	11,3	7,7
2	3,5	5,5	8,8	0,035	0,055	0,088	6,18	6,55	7,5
3	4,7	4,8	9,5	0,047	0,048	0,095	4,6	7,5	5,95
4	3,5	3,7	7,2	0,035	0,037	0,072	6,18	9,75	7,9
5	4,5	3,8	8,3	0,045	0,038	0,083	4,8	9,45	6,9

Если принять изменение скорости движения порций прямо пропорциональным пройденному расстоянию в молотильном зазоре, то можно определить скорость движения порций в начале и конце подбарабанья, то есть на входе и выходе из молотильного зазора. Установлено, что скорости движения отдельных порций в одном опыте разные (рис.3) и зависят от толщины слоя (усилия сжатия) порции. Средняя скорость движения порций в описываемом опыте в начале подбарабанья составляла 3,6 м/с, в конце – 12,0 м/с. Средняя скорость по всей длине подбарабанья V_c=7,8 м/с. Если порции имеют меньшую толщину (усилие сжатия), то и скорость движения их меньше, например, в начале подбарабанья 3,3 м/с, в конце 5,4 м/с, а среднюю в молотильном зазоре 4,25 м/с [2].

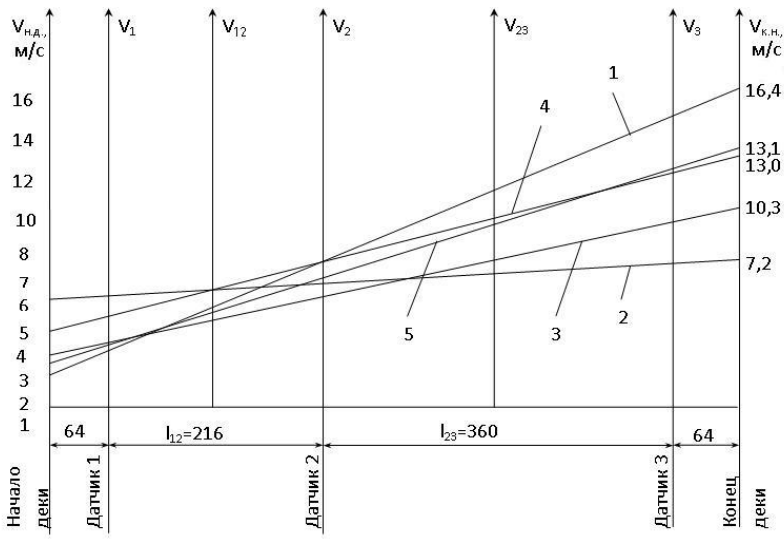


Рис.3. График изменения скорости движения отдельных порций хлебной массы (1-5) в молотильном зазоре по длине деки

Определив из записей усилий сжатия (осциллограмм) время прохождения порции над датчиком и зная скорость движения этой порции над ним, были рассчитаны длины порций над каждым датчиком подбарабанья. Установлено, что при движении в подбарабанье порции увеличиваются по длине. Так, одна из порций под первым датчиком в начале подбарабанья имела длину 0,85 м, под вторым датчиком - 1,15 м, а под третьим - уже 2,05 м. Изучение характера изменения размеров других порций разной толщины позволило установить, что при движении в молотильном зазоре

все порции в рассматриваемом опыте увеличивались практически на одну величину, в 2,35 раза, то есть коэффициент растаскивания остается постоянным для одного опыта и не зависит от первоначальной толщины порций. С увеличением длины порций соответственно должна уменьшаться и толщина слоя по мере продвижения к выходу из молотильного зазора. Зная общую массу хлебного потока, подаваемого в комбайн за опыт (85 кг) и число порций, обнаруженных на осциллограмме за опыт (19), можно определить среднюю массу порции, подаваемую наклонной камерой в молотильный зазор (4,47 кг). Учитывая соотношение зерна к соломе, плотность соломы, ширину молотильного зазора и длину порции на входе и выходе подбарабанья, можно рассчитать толщину слоя порции на входе и выходе из молотильного зазора. Для рассматриваемого примера толщина на входе составила 130 мм, на выходе - 54 мм.

Время пребывания обмолачиваемого колоса в молотильном зазоре и соответственно число воздействий по нему бичом больше при малой толщине порций. Так, при большой порции время пребывания составляет 0,09 с, а при малой порции - 0,16 с. Поэтому для лучшего обмолота и сепарации зерна необходимо движение хлебной массы в молотильном зазоре малыми порциями, а еще лучше равномерным слоем, который обеспечит минимальную толщину обмолачиваемого слоя.

Выводы. Изучение процесса сжатия хлебной массы в молотильном зазоре позволило сделать следующие выводы:

- Движение хлебной массы в молотильном зазоре носит порционный характер.
- Порции существуют уже в наклонной камере и сохраняются до выхода из молотильного зазора.
- Применяемая методика позволяет определять скорость движения, длину и толщину порций хлебной массы в любой точке подбарабанья, время пребывания и число ударов бичей по колосу.
- Скорость движения порций зависит от их толщины: малые порции двигаются с меньшей скоростью и дольше находятся в зоне обмолота и сепарации.
- Размер порций увеличивается по длине и уменьшается по толщине по мере продвижения её к выходу из молотильного зазора. Коэффициент растаскивания составляет 2,35.
- Для улучшения качества работы молотильного устройства зерноуборочных комбайнов необходимо организовать движение хлебного потока в молотильном зазоре не порционно, а более равномерным слоем.

Библиографический список

1. *Липкович Э.И.* Процессы обмолота и сепарации в молотильных аппаратах зерноуборочных комбайнов: пос. для вузов /Э.И. Липкович /ВНИИТИМЭСХ. – Зерноград, 1973. – 173 с.

2. *Зайцев А.А.* Исследование скорости движения хлебной массы в молотильном канале / А.А.Зайцев, Н.В.Зайцева // Разработка конструкций и исследование сельскохозяйственных машин / РИСХМ. – Ростов н/Д, 1988. – С. 24-29.

Материал поступил в редакцию 02.06.08.

A.A. LYASHENKO, O.N. KOSILOV

TECHNIQUE AND RESULTS OF RESEARCH OF SOME PARAMETERS OF GRAIN WEIGHT AT ITS MOVEMENT IN A GAP OF A THRESHER OF A COMBINE HARVESTER

To cite data technique and results of research of speed of movement and the sizes of portions of grain weight on the basis of records of oscillograms of efforts of compression moving in a gap of a thresher of a grain stream.

ЛЯШЕНКО Анатолий Александрович (р.1940), доцент кафедры «Сельскохозяйственные машины и оборудование» РГАСХМ, кандидат технических наук (1976). Окончил РИСХМ (1968).
Область научных интересов: исследование процессов обмолота и сепарации зерновых культур.
Автор более 70 научных работ, 5 авторских свидетельств на изобретения.

КОСИЛОВ Олег Николаевич (р.1937), профессор (2005) кафедры «Сельскохозяйственные машины и оборудование» РГАСХМ, кандидат технических наук (1966). Окончил РИСХМ (1960).
Научные интересы связаны с исследованием процессов обмолота и сепарации зерновых культур.
Автор более 70 научных работ, одного патента на изобретение.

УДК 62-501.72

И.Э. ЛИПКОВИЧ, Н.В. ПЕТРЕНКО

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ АГРЕГАТОВ КАК ЧЕЛОВЕКОМАШИННЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются вопросы организации человекомашинных систем с целью повышения производительности уборочных агрегатов. Получены рациональные режимы работы оператора.
Ключевые слова: *уборка зерновых, человекомашинная система, производительность зерноуборочных агрегатов.*

Уборка зерновых колосовых является одним из наиболее трудоемких процессов, в котором занято огромное количество мобильных агрегатов, транспортных средств, стационарного оборудования, а также колоссальные трудовые ресурсы [1].

Важнейшим организационным резервом роста производительности зерноуборочных агрегатов как человекомашинных систем (ЧМС) является рациональное использование рабочего времени. Проведенные массовые хронометражные наблюдения показывают, что внутрисменные потери рабочего времени на уборке зерновых колосовых достигают 25-30%. Во многих хозяйствах не уделяется должного внимания внедрению сменной работы [2].

Дальнейший рост объемов и повышение производительности зерноуборочных агрегатов как ЧМС во многом зависит от внедрения рациональных режимов труда, применение которых позволит улучшить использование техники и трудовых ресурсов, сократить длительность выполнения полевых работ, снизить потери урожая, повысить в целом рентабельность зернового производства. Применение рациональных режимов работ на уборке зерновых колосовых является одним из важнейших факторов повышения эффективности использования ЧМС и создания благоприятных условий для механизаторов в самый тяжёлый и энергонапряжённый период полевых работ.

Влиянию режима работы на повышение производительности зерноуборочных агрегатов посвящены исследования ГОСНИТИ, ВНИПТИМЭСХ, ВНИИ охраны труда и др. Режим работы определяет уровень и интенсивность адаптации человека-оператора, его утомляемость, работоспособность, его технологическую надежность, следовательно, надежность всей ЧМС как в рамках элемента отдельного агрегата, так и организационной системы в целом.

Основная цель изучения режимов работы — получить некоторые основополагающие сведения, которыми можно руководствоваться при изменениях графиков работы, и в то же время показать, к каким осложнениям может привести использование произвольно составленных графиков на производительность зерноуборочных агрегатов как ЧМС.

Исследования отчетливо показывают зависимость биологической активности и производительности труда от времени дня. Они продемонстрировали, что у человека имеется внутренняя биологическая система хронометрирования [3], продолжительность естественного цикла этого внут-

реннего хронометра, обычно называемого эндогенными часами или осциллятором, составляет около 24 ч [4]. В обычных условиях эти часы устанавливаются в исходное положение на суточной основе, так что продолжительность цикла у них составляет точно 24 ч, поэтому их называют околосуточной, или циркадианной системой.

При анализе динамики работоспособности нужно иметь в виду, что показатель производительности труда, являющийся критерием оценки уровня работоспособности, зависит не только от физиологических и психологических факторов, но и от организационных факторов. Необходимо учитывать, что перерывы в работе из-за неисправностей комбайнов, ожидания машин для выгрузки и по другим различным, независимым от оператора причинам нарушают ритм физиологических функций, привычных для организма, возбуждают нервную систему; комбайнер быстрее устаёт и с устранением простоя опять ему нужно время для вхождения в работу, причем более длительное, чем при нормальных условиях труда. Производительность зерноуборочных агрегатов как ЧМС зависит не только от ранее разработанных организационных критериев ВНИПТИМЭСХ, но и от выбора рационального режима труда, соответствующего изменению динамики работоспособности оператора.

Анализ литературных источников показывает, что возможны два типа графиков изменения работоспособности оператора в течение смены (рис.1 и 2).

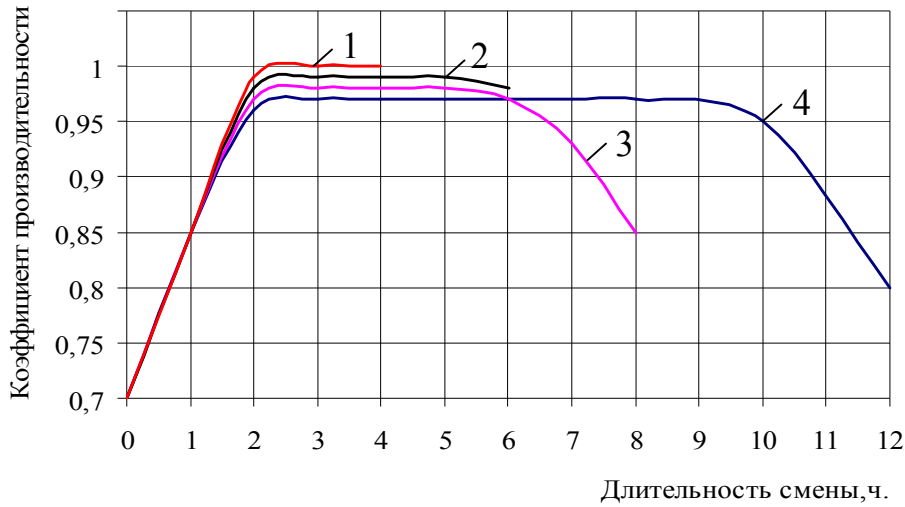


Рис.1. График изменения коэффициента производительности при различных режимах работы: 1 – четырёхчасовом; 2 – шестичасовом; 3 – восьмичасовом; 4 – двенадцатичасовом

При построении графиков, представленных на рис.1, мы опирались на работы Х. Вернон, А.П. Бружеса, В.С. Раевского. Эти авторы считают, что уровень установившейся максимальной производительности после перерывов на отдых остаётся прежним.

При построении второго типа графика производительности мы опирались на исследования Загрядского В.П., Егорова А.С., Косилова С.А., Громова М.Н., которые считают, что изменение динамики работоспособности операторов в течение рабочего дня представляет собой кривую линию,

прерываемую обеденным перерывом, после которого уровень максимальной производительности не достигает дообеденной.

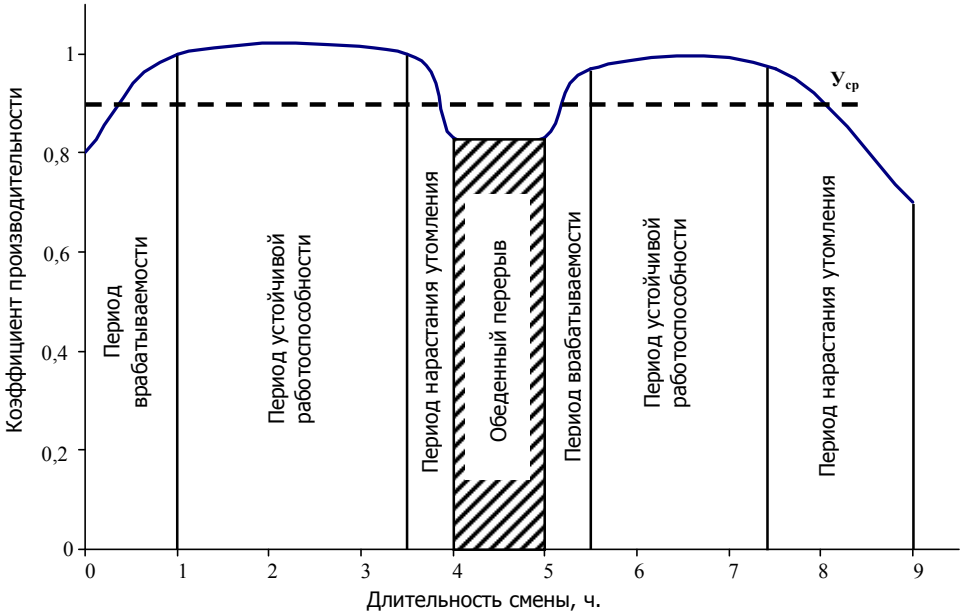


Рис.2. Примерный график изменения работоспособности ЧМС на протяжении 8-часовой рабочей смены

Определим среднее значение коэффициента производительности ЧМС для графика, представленного на рис.2:

$$y_{ср} = \frac{\frac{\int_{t_0}^{t_1} y dt}{t_0 - t_1} + \frac{\int_{t_1}^{t_2} y dt}{t_2 - t_1} + \frac{\int_{t_2}^{t_3} y dt}{t_3 - t_2} + \frac{\int_{t_4}^{t_5} y dt}{t_5 - t_4} + \frac{\int_{t_5}^{t_6} y dt}{t_6 - t_5} + \frac{\int_{t_6}^{t_7} y dt}{t_7 - t_6}}{t_3 - t_0 + t_7 - t_4}, \quad (1)$$

где $y_{ср}$ – среднее значение коэффициента производительности ЧМС; t – длительность смены; y – текущий коэффициент производительности ЧМС.

Подставляя значения из примерного графика изменения работоспособности ЧМС на протяжении 8-часовой рабочей смены в формулу (1), получим, что $y_{ср}$=0,88. При организации работ необходимо так выбирать её режим, чтобы приблизить значение данного коэффициента к единице в максимальной степени и постараться выпрямить "кривую" изменения работоспособности оператора. Нанесем полученное значение среднего коэффициента производительности на график, представленный на рис.2.

Из вышесказанного были составлены графики режимов работы уборочных агрегатов как ЧМС с учётом влияния физиологических особенностей операторов на изменение производительности в течение смены, которые предусматривают оптимальную продолжительность смены и внутрисменных перерывов, нормальную интенсивность труда; правильное чередование периодов трудовой деятельности с перерывами на отдых и принятие пищи; способствующее повышению суточной выработки операторов, сокращению сроков уборочных работ и потерь зерна, при сохранении приемлемого уровня затрат энергии оператором.

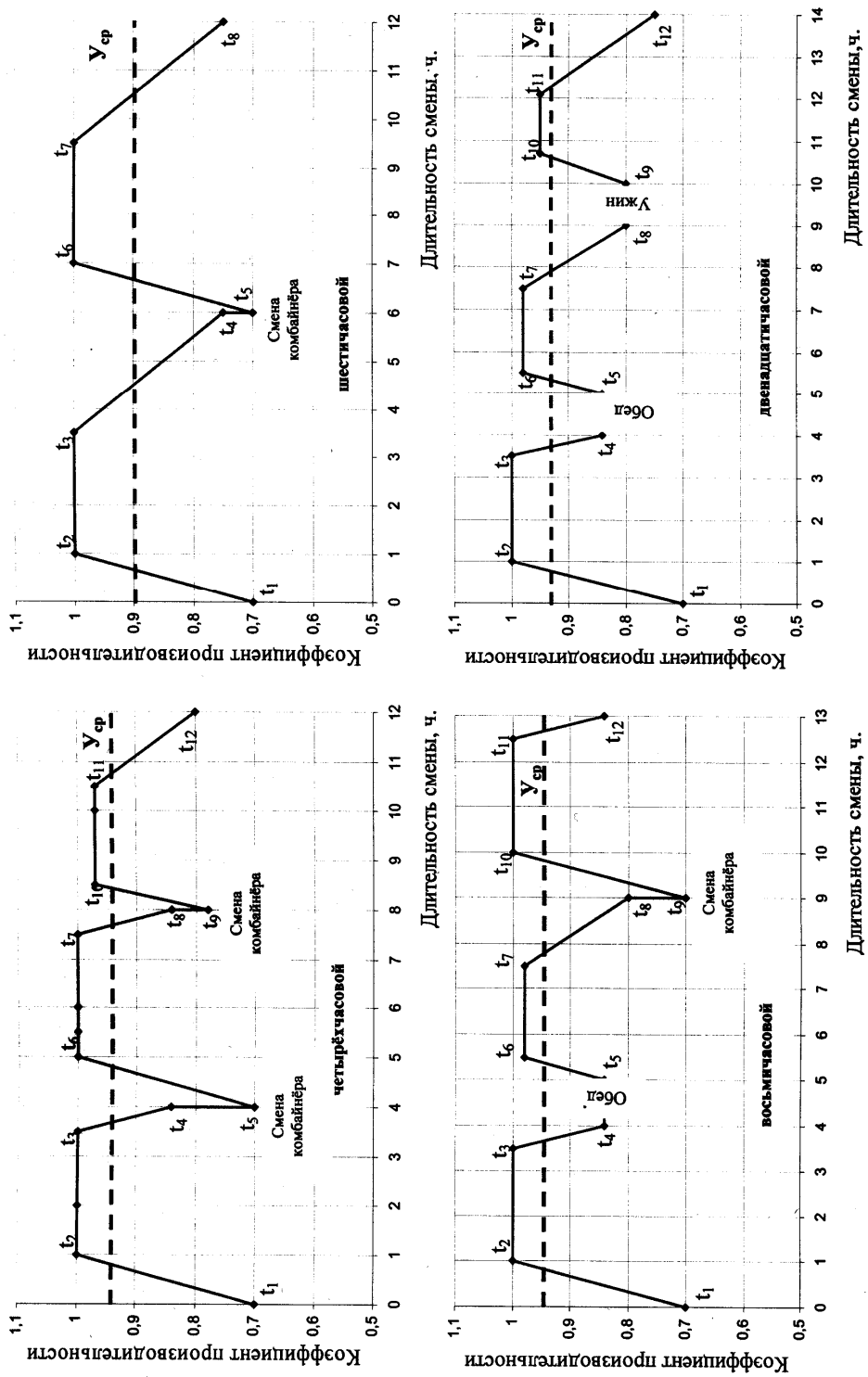


Рис.3. Графики изменения коэффициента производительности при различных режимах работ

Первый режим предусматривает смену комбайнеров через каждые четыре часа. На агрегате работают два механизатора последовательно, сменяясь через каждые четыре часа без перерывов.

Второй предусматривает смену комбайнеров через каждые шесть часов. На агрегате работают два механизатора последовательно, сменяясь через каждые шесть часов без перерывов.

Третий предусматривает работу в течение восьми часов с перерывом на приём пищи и кратковременный отдых в течение одного часа через четыре часа работы. После восьми часов работы первого оператора сменяет второй.

Четвертый предусматривает работу в течение двенадцати часов с двумя перерывами на приём пищи и кратковременный отдых в течение одного часа через четыре часа работы.

На рис.3 представлены графики изменения коэффициента $У_{ср}$ производительности рассматриваемых режимах работ и его среднее значение, определяемое по приведенным зависимостям.

Для четырехчасового, восьмичасового и двенадцатичасового режимов:

$$У_{ср} = \frac{1}{T}[\frac{y_1 + y_2}{2}(t_2 - t_1) + y_3 \cdot (t_3 - t_2) + \frac{y_3 + y_4}{2}(t_4 - t_3) + \frac{y_5 + y_6}{2}(t_6 - t_5) + y_7 \cdot (t_7 - t_6) + \frac{y_7 + y_8}{2}(t_8 - t_7) + \frac{y_9 + y_{10}}{2}(t_{10} - t_9) + y_{11} \cdot (t_{11} - t_{10}) + \frac{y_{11} + y_{12}}{2}(t_{12} - t_{11})]. \quad (2)$$

Для шестичасового режима, поскольку оператор работает в двух сменном режиме, уравнение принимает вид:

$$У_{ср} = \frac{1}{T}[\frac{y_1 + y_2}{2}(t_2 - t_1) + y_3 \cdot (t_3 - t_2) + \frac{y_3 + y_4}{2}(t_4 - t_3) + \frac{y_5 + y_6}{2}(t_6 - t_5) + y_7 \cdot (t_7 - t_6) + \frac{y_7 + y_8}{2}(t_8 - t_7)]. \quad (3)$$

Подставляя значения коэффициентов производительности и длительности работы из таблицы в формулы (2) и (3), получаем $У_{ср}$=0,94 для четырёхчасового, $У_{ср}$=0,89 для шестичасового, $У_{ср}$=0,95 для восьмичасового и $У_{ср}$=0,93 для двенадцатичасового. Нанесем полученные значения средних коэффициентов производительности на графики, представленные на рис.3.

Значения коэффициентов производительности (y) и длительности работы (t) для вычисления среднего коэффициента производительности ($У_{ср}$)

Для четырёхчасового режима												
t	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
	0	1	3,5	4	4	5	7,5	8	8	8,5	10,5	12
y	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}
	0,7	1	1	0,84	0,7	1	1	0,84	0,78	0,97	0,97	0,8
Для шестичасового режима												
t	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	–	–	–	–
	0	1	3,5	6	6	7	9,5	12	–	–	–	–
y	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	–	–	–	–
	0,7	1	1	0,75	0,7	1	1	0,75	–	–	–	–

Окончание табл.

Для восьмичасового режима												
t	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
	0	1	3,5	4	5	5,5	7,5	9	9	10	12,5	13
y	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}
	0,7	1	1	0,84	0,84	0,97	0,97	0,8	0,7	1	1	0,84
Для двенадцатичасового режима												
t	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
	0	1	3,5	4	5	5,5	7,5	9	10	10,7	12,1	14
y	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}
	0,7	1	1	0,84	0,84	0,97	0,97	0,8	0,8	0,95	0,95	0,75

В рассматриваемых нами работах производительность труда определяли, опираясь только на теоретические предположения, не изучая изменения динамики работоспособности на практике. Однако важно не только рационально построить режим работы, но и предусмотреть возможность реализации его в течение всех суток. При этом должно учитываться, что наивысшая работоспособность бывает в утренние и дневные часы и наименьшая – в ночное время [5].

Рациональная организация сменного режима должна обеспечивать оптимальную продолжительность смены и внутрисменных перерывов с целью полного использования рабочего времени смены; восстановления работоспособности, нормальной интенсивности труда; правильное чередование периодов трудовой деятельности с перерывами на отдых и принятие пищи; время начала и конца рабочей смены, создающее наиболее благоприятные условия для труда и способствующее повышению производительности зерноуборочных агрегатов как ЧМС [6].

Выводы:

1. Количество режимов работ определяется не только физиологическими особенностями человека, но и организацией работы.
2. Производительность ЧМС не постоянна, она изменяется в зависимости от длительности работы оператора или применяемого режима.
3. Теоретически предпочтительным является восьмичасовой режим работы, так как при данном режиме коэффициент производительности наибольший $У_{ср}$=0,95.

Библиографический список

1. *Липкович И.Э.* Человекомашинные системы в агроинженерной сфере растениеводства: механико-эргономические основы создания и функционирования./ И.Э. Липкович. – Ростов н/Д: ООО «Терра», 2004. – 612с.

2. Рекомендации по совершенствованию организации основных трудовых процессов при производстве зерновых /колосовых/ в колхозах и совхозах Краснодарского края. – Краснодар, 1973. – 142 с.

3. Человеческий фактор: в 6 т.; под ред. Г. Салвенди; пер. с англ. под общей ред. В.И. Зинченко и В.М. Мунипова. – М.: Мир, 1991.

4. *Wever R.A.* The circadian system of man. Berlin: Springer-Verlag, 1979.

5. *Здоровцов А.И.* Научная организация и нормирование труда на сельскохозяйственных предприятиях / А.И. Здоровцов, И.К. Ищенко, А.В. Шкилев. – М.: Колос. 1979. – 346 с.

6. *Курбатов И.Д.* Организация труда в условиях высокомеханизированного сельскохозяйственного производства / И.Д. Курбатов. – М.: Экономика, 1975.

Материал поступил в редакцию 09.06.08.

I.E. LIPKOVICH AND N.V. PETRENKO ARTICLE

TRAIN HARVESTING UNIT PRODUCTIVITY AS MAN-MACHINE SYSTEM

The problem of grain harvesting unit productivity as MMS is dealt with the method of rational labor regime introduction. The plot of productivity coefficient change are made up by different operating conditions of personnel. The plots consider the influence of man factor on changing of the grain harvesting unit productivity as MMS.

Липкович Игорь Эдуардович, доцент кафедры БТПиП, доктор технических наук. Окончил АЧИМСХ (1987).
Сфера интересов: безопасность жизнедеятельности.
Автор более 30 научных работ.

Петренко Надежда Владимировна, аспирантка кафедры БТПиП. Окончила АЧГАА (2005).
Автор 4 научных работ.

УДК 631.3-82-192(04)

В.Н. ГЕЛЕВЕРОВ, А.Д. ДЬЯЧЕНКО

САМОХОДНЫЕ ЗЕРНОУБОРОЧНЫЕ КОМБАЙНЫ КАК ОБЪЕКТЫ ГИДРОФИКАЦИИ

Проведен анализ назначения конструктивно-технологического устройства зерноуборочных комбайнов, а также состава всех энергопотребителей, показаны возможности их гидрофикации.
Ключевые слова: *самоходные зерноуборочные комбайны, устройство, технологический процесс, рабочие органы, механизмы управления, автоматические системы, приводы.*

Введение. Основным техническим средством уборки зерновых культур являются самоходные зерноуборочные комбайны. По состоянию на 2008 г. их парк в России составлял около 400 тыс., в странах ЕС – 500 тыс., в США – 660 тыс. В качестве энергетического средства зерноуборочные комбайны оснащаются двигателем внутреннего сгорания мощностью от 55 до 250 кВт, в России – в основном от 90 до 130 кВт.

Одним из главных направлений совершенствования зерноуборочных комбайнов является комплексная гидрофикация их приводов на основе применения перспективных схемотехнических решений. Реализация этого направления возможна прежде всего на основе детального анализа устройства зерноуборочных комбайнов, реализуемых ими технологических процессов, а также состава и характеристик энергопотребителей комбайнов.

Зерноуборочные комбайны представляют собой совокупность логически связанных между собой функциональных блоков (рис.1).

Уборка биологического урожая осуществляется зерноуборочными комбайнами в ходе непрерывного технологического процесса (рис.2) посредством рабочих органов, в основном активных (в технологическом процессе, приведенном на рис.2, из тридцати двух рабочих органов пассивных только шесть), функционирующих за счет использования энергии источника.

Управление рабочими органами самоходных зерноуборочных комбайнов в полевых и транспортных условиях обеспечивается посредством механизмов позиционирования, регулирования, реверсирования и включения-выключения (табл.1).

Таблица 1

Позиционирование		
Объекты, цели		Механизмы
1	2	3
1	Мотовило жатки относительно режущего аппарата в вертикальном направлении	Два функционирующие синхронно шарнирно-рычажные, имеющие по одному звену с изменяющейся длиной
2	То же, в горизонтальном направлении	
3	Жатка в вертикальном направлении	
4	Подбарабанье относительно барабана	Шарнирно-рычажный
5	Жалюзи верхнего решета, изменение угла наклона	
6	Шнек бункера выгрузной, обеспечение транспортного и рабочего положений	Шарнирно-рычажный, имеющий звено с изменяющейся длиной

Окончание табл.1

1	2	3
8	Копнитель, обеспечение положений: загрузка и выгрузка	Шарнирно-рычажный фиксируемый управляемыми защелками
Регулирование		
1	Мотовило жатки, частота вращения	Вариатор
2	Барабан, частота вращения	
3	Вентилятор очистки, частота вращения	
4	Ведущие колеса, частота вращения	
Реверсирование		
1	Нож режущего аппарата	Кривошипно-шатунный, качающаяся шайба, планетарный
2	Шнек жатки при его забивании	Реверсивный редуктор
3	Транспортер наклонной камеры при его забивании	Рычажно-храповой
4	Молотильный аппарат при его забивании	
Включение-выключение		
1	Рабочие органы жатки при их забивании, а также при маневровых и транспортных перемещениях комбайна	Шарнирно-рычажный
2	Молотильный барабан	
3	Выгрузное устройство бункера	
4	Механизм выгрузки копны	

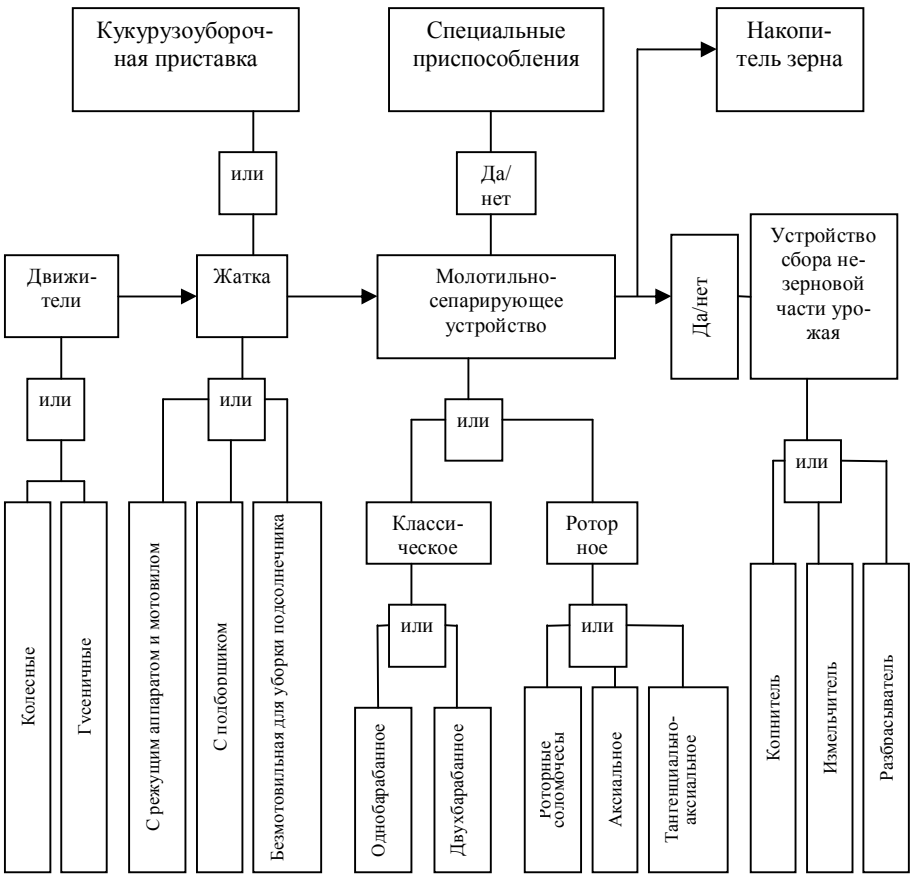


Рис. 1. Структура элементов зерноуборочных комбайнов

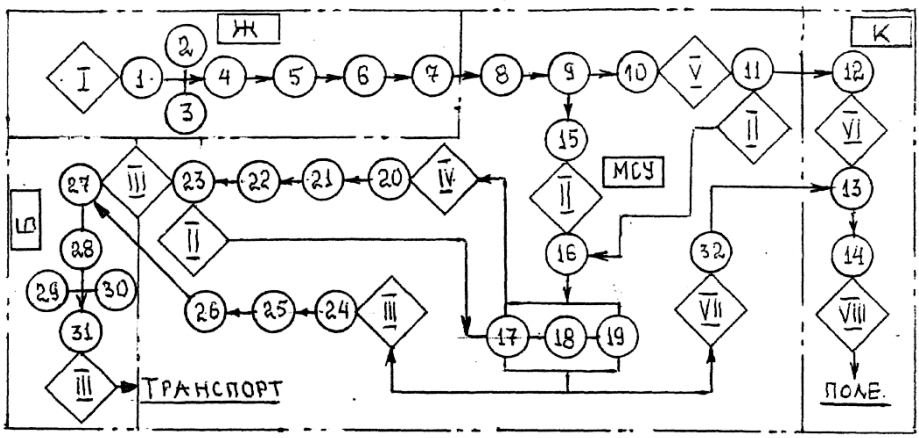


Рис. 2. Схема технологического процесса зерноуборочного комбайна:

Биомасса

I - стеблестой; II - ворох зерновой; III - зерно; IV - колоски;
V - ворох соломенный; VI - солома; VII - полова; VIII - копна.

- рабочие органы; Ж - жатка; К - копнитель;

МСУ - молотильно-сепарирующее устройство; Б - бункер

1 - делители; 2 - мотовило; 3 - режущий аппарат; 4 - шнек; 5 - пальчиковый механизм; 6 - битер проставки; 7 - транспортер наклонной камеры; 8 - битер приемный; 9 - барабан; 10 - битер отбойный; 11 - соломотряс; 12 - соломонабиватель; 13 - камера копнителя; 14 - механизм сброса копны; 15 - подбарабанье; 16 - транспортная доска; 17 - решето верхнее; 18 - решето нижнее; 19 - вентилятор; 20 - шнек колосовой; 21 - элеватор; 22 – устройство домолачивающее; 23 - зерновой шнек; 24 - скатная доска; 25 - шнек зерновой; 26 - элеватор; 27 - шнек загрузочный бункера; 28 - бункер; 29 - шнек горизонтальный выгрузной бункера; 30 - вибропобудитель бункера; 31 - выгрузной наклонный шнек бункера; 32 - половонабиватель

Неотъемлемой частью конструкций современных зерноуборочных комбайнов становятся средства автоматизации (табл.2).

Таблица 2

Системы автоматического регулирования высоты среза
На основе безопорного копирования жаткой рельефа поля стабилизируется высота среза, её независимость от колебаний осттова комбайна, что и обеспечивает снижение потерь урожая за жаткой, а также эффективное выполнение технологических операций молотильно-сепарирующим блоком комбайна.
Системы автоматического вождения комбайна
Автоматическое вождение зерноуборочного комбайна, например по валку убираемой культуры, обеспечивает соответствующее позиционирование приемных устройств жатки (режущего аппарата, мотовила, подборщика и т.д.), в результате повышается эффективность их работы, а также существенно облегчается труд комбайнера.
Системы автоматического выравнивания остова комбайна
Автоматическое выравнивание остова зерноуборочного комбайна при работе на склонах обеспечивает безопасность проведения уборочных работ, а также обеспечивает нормальное протекание технологического процесса без увеличения потерь зерна.
Системы автоматического контроля положения транспортного средства относительно комбайна
Системы создают условия для увеличения технологической скорости уборочных работ посредством включения-выключения выгрузного транспортера бункера комбайна в зависимости от взаимного расположения комбайна и транспортного средства.

Окончание табл.2

Автоматические системы рулевого управления комбайном
Эти системы существенно облегчают управление комбайном, так как они представляют собой автоматические следящие системы, в функционировании которых комбайнер реализует лишь подачу входного сигнала управления.
Автоматические системы управления загрузочными режимами зерноуборочных комбайнов (одномерные, двухмерные, многоконтурные, самонастраивающиеся). Эти системы разрабатываются по параметрам состояния, измерение которых характеризуют загрузку зерноуборочного комбайна, компенсируют влияние внешних возмущений значительно эффективнее, чем комбайнер.

Автоматизация уборочных процессов зерноуборочных комбайнов позволяет повысить не только скорость уборки и производительность комбайнов, но и качество уборки, что в значительной мере объясняется разницей во времени реакции человека на случайные сигналы (0,2-0,3 с) и автоматических регуляторов (нескольких миллисекунд). Применение средств автоматизации становится актуальным также из-за усложнения функций комбайнера, поскольку у него совмещаются роли водителя и оператора, а также в связи с тем, что затрудняется контроль за рабочими органами в условиях герметизации и звукоизоляции кабины и значительного удаления рабочих органов от места комбайнера.

В качестве энергетического средства зерноуборочные комбайны оснащаются двигателем внутреннего сгорания, энергия которого используется энергопотребителями (движителями; активными и пассивными рабочими органами; механизмами позиционирования, регулирования, реверсирования, включения-выключения; автоматическими системами) комбайна для реализации маневровых и транспортных перемещений комбайна, технологических процессов уборки биологического урожая, а также для обеспечения комфортных условий работы в кабине комбайнера. В конструкциях современных зерноуборочных комбайнов энергетические потоки от источника к потребителям формируются посредством как гидравлических, так и механических приводов. Посредством гидравлического привода формируются энергопотоки к движителям (рис.3), механизму управляемых колес (рис.4), а также к периодически действующим механизмам позиционирования, реверсирования, регулирования, включения-выключения (рис.5). Суммарная мощность этих энергетических потоков составляет около 35% мощности энергетического источника комбайна.

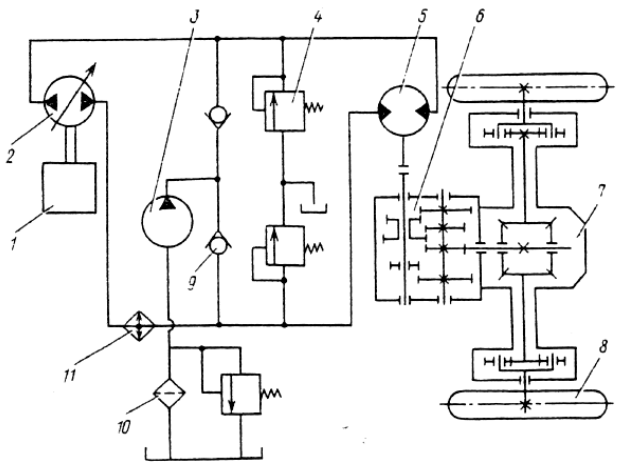


Рис.3. Схема гидротрансмиссии комбайна «Дон-1500»: 1-двигатель; 2-регулируемый насос; 3-насос подпитки; 4-клапан; 5-гидромотор; 6-коробка передач; 7-задний мост; 8-ведущие колеса; 9-обратный клапан; 10-фильтр; 11-охладитель

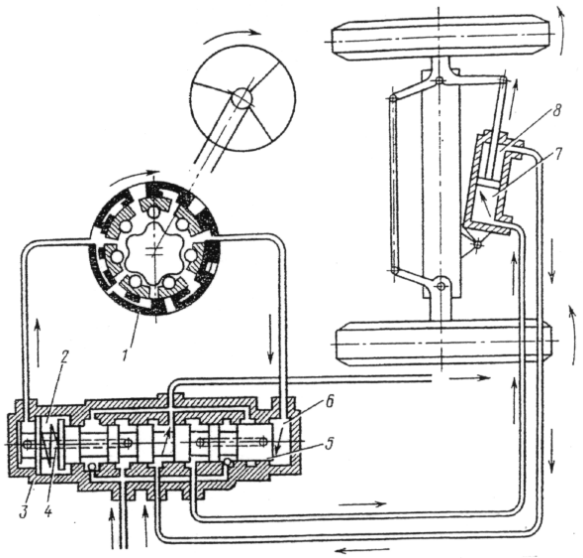


Рис.4. Схема гидравлического управления самоходными машинами: 1 - насос-дозатор; 2, 6 - полости распределителя; 3 - крышка; 4 - пружина; 5 - золотник; 7, 8 - полости гидроцилиндра

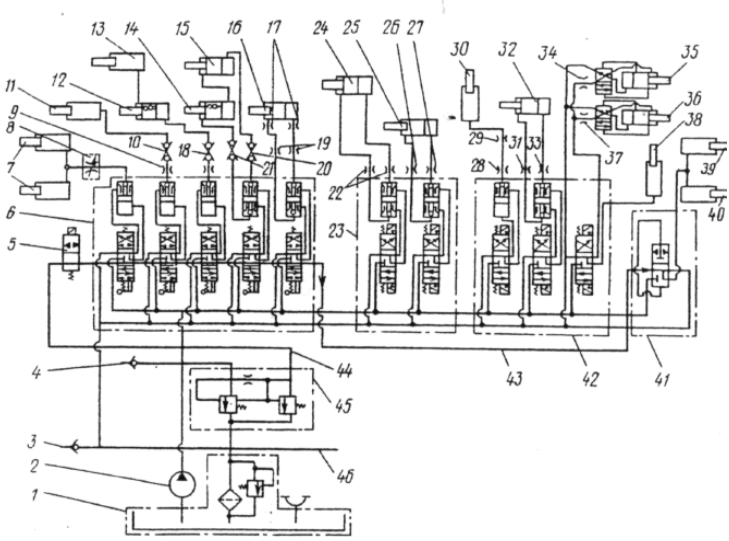


Рис. 5 Схема гидравлической системы управления механизмами зерноуборочного комбайна «Дон-1500»: 1 - резервуар; 2 - насос; 3, 4 - наружные полумуфты; 5 - гидроклапан с электромагнитным управлением; 6 - гидрораспределитель с ручным управлением; 7 - гидроцилиндры подъема и опускания жатки; 8 - дросселирующий регулируемый кран; 9, 17, 19, 23, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 34, 37, 41 - распределители; 10, 18, 20, 21 - муфты; 11 - гидроцилиндр вариатора мотовила; 12 и 13 - гидроцилиндры вертикального перемещения мотовила (левый и правый); 14 и 15 - гидроцилиндры горизонтального перемещения мотовила (левый и правый); 16 - гидроцилиндр механизма включения молотилки; 22 - двухсекционный гидрораспределитель с электромагнитным управлением; 24 - гидроцилиндр прокрутки наклонной камеры; 25 - гидроцилиндр привода выгрузных шнеков; 30 - гидроцилиндр вариатора молотильного барабана; 32 - гидроцилиндр поворота наклонного выгрузного шнека; 35, 36 - гидродвигатели для вибрации стенки бункера; 38 - гидроцилиндр открытия копнителя; 39, 40 – гидроцилиндры закрытия копнителя; 42 - трехсекционный гидрораспределитель с электромагнитным управлением; 43, 44 - трубопроводы канала управления; 45 - предохранительно-переливной клапан основной гидросистемы; 46 - трубопровод канала соединения с системой рулевого управления

Посредством механического привода формируются энергетические потоки к активным рабочим органам. Суммарная мощность этих потоков около 60% мощности двигателя. В связи с тем, что активные рабочие органы значительно удалены от источника энергии и имеют относительно него сложную пространственную ориентацию, энергетические потоки к ним формируются в основном посредством цепных и ременных передач. Например, зерноуборочный комбайн «Дон-1500» с жаткой захватом 6м и копнителем имеет трансмиссию (рис.6), состоящую из 17 клиноременных передач, 15 цепных передач, 3 клиноременных вариаторов. Для привода наиболее ответственных рабочих органов в четырех контурах применены многоручьевые ремни. В наиболее ответственных и нагруженных передачах вместо обычных натяжных устройств устанавливаются подпружиненные натяжные устройства, обеспечивающие автоматическое постоянное натяжение ремней.

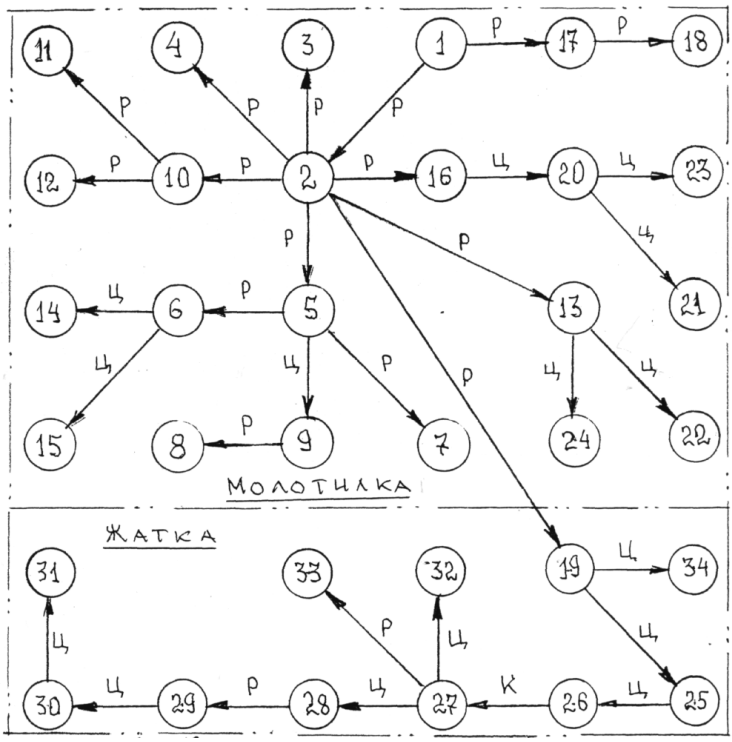


Рис.6. Схема передач комбайна «Дон-1500»: ○ - валы; Ц – цепные передачи; Р – ременные передачи; К – карданная передача; 1 – двигателя; 2 – битера; 3 – барабана; 4 – домолота; 5 – заднего контрпривода; 6 – верхний колосового элеватора; 7 – соломотряса; 8 – соломонабивателя; 9 – половонабивателя; 10 – контрпривода вентилятора; 11 – вариатора вентилятора; 12 – очистки; 13 – контрпривода выгрузного устройства; 14 – нижний колосового элеватора; 15 – распределительного шнека; 16 – контрпривода зерновой группы; 17 – гидронасоса; 18 – компрессора кондиционера; 19 – наклонной камеры; 20 – верхний зерновой группы; 21 – шнека загрузочного бункера; 22 – шнека выгрузного горизонтального; 23 – нижний зернового элеватора; 24 – шнека наклонного выгрузного; 25 – трансмиссионный; 26 – контрпривода жатки; 27 – жатки; 28 – вариатора мотовила ведущий; 29 – вариатора мотовила ведомый; 30 – контрпривода мотовила; 31 – мотовила; 32 – шнека жатки; 33 – механизма привода ножа; 34 – битера проставки

Меры по повышению потребительских свойств и качеств зерноуборочных комбайнов, а также их эксплуатационных показателей в рамках концепции развития механизации уборки зерновых культур [8] предусматривают гидрофикацию комбайнов, электрогидравлическое управление их рабочими органами и механизмами. Применительно к зерноуборочным комбайнам (например, «Дон-1500») комплексная их гидрофикация может быть реализована заменой механического привода их активных рабочих органов гидравлическим, принципиальная схема которого представлена на рис.7.

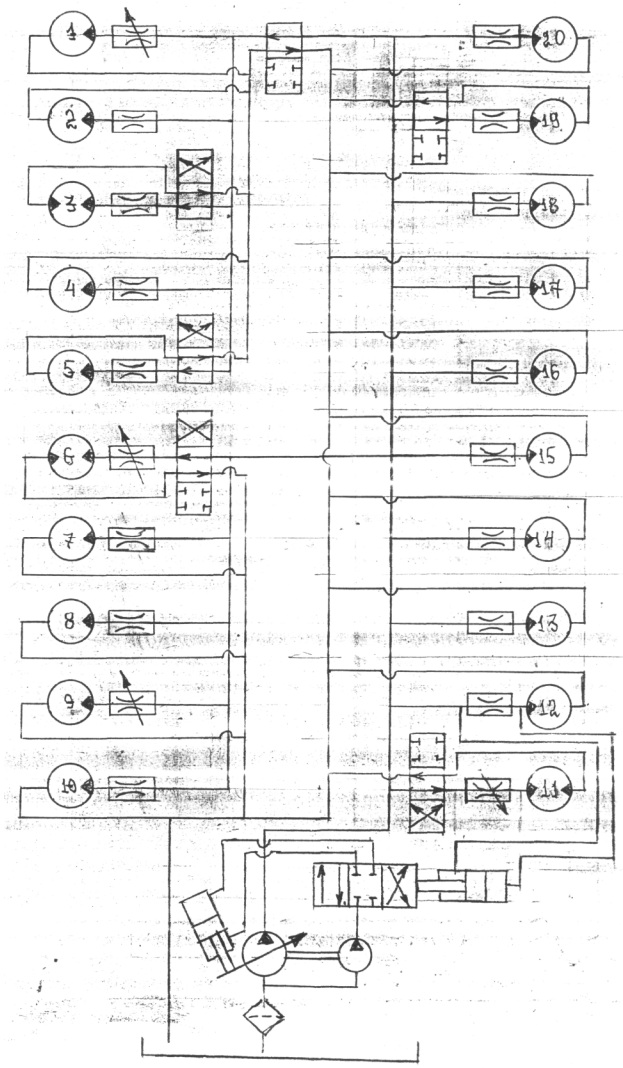


Рис. 7 Принципиальная схема гидравлической системы активных рабочих органов зерноуборочного комбайна «Дон-1500»; гидродвигатели: 1 - мотовила; 2 - ножа режущего аппарата; 3 - шнека жатки; 4 - битера проставки; 5 - транспортера наклонной камеры; 6 - барабана; 7 - отбойного битера; 8 - решетного стана; 9 - вентилятора; 10 - соломотряса; 11 - соломонабивателя; 12 - шнека колосового домолота; 13 - элеватора домолота; 15 - шнека зернового домолота; 16 - шнека зернового; 17 - элеватора; 18 - шнеков загрузочных бункера; 19 - шнеков выгрузочных бункера; 20 - половонабивателя

Гидрофикация активных рабочих органов зерноуборочных комбайнов «Дон-1500» дает следующие перспективные возможности:

- уменьшение числа валов с соответствующими шарнирными опорами на 12 единиц (валы контрприводов – 6 шт, валы вариаторов – 3 шт, вал механизма привода ножа жатки, трансмиссионный вал жатки);
- исключение из конструкции привода громоздких и тяжелых клиноременных (17 единиц) и цепных (15 единиц) передач, требующих оснащения специальными механизмами натяжения, а также громоздких и металлоемких конструктивных элементов защиты;
- исключение необходимости сложных, металлоемких механизмов: клиноременных вариаторов (вентилятора, мотовила, барабана); механизма привода режущего аппарата; реверсивного редуктора шнека жатки; механизмов реверса (наклонной камеры, молотильного барабана); механизмов включения и экстренного отключения жатки; привода молотилки; контрпривода выгрузного устройства бункера;
- существенное упрощение и повышение надежности системы защиты от перегрузок.

Кроме того, исследованиями [9] было установлено, что оснащение зерноуборочных комбайнов однотипными (гидравлическими) трансмиссиями вместо разнотипных (механической и гидравлической) исключает негативное влияние дифференциальной реономной (нестационарной) связи между разнотипными трансмиссиями и тем самым повышает эффективность зерноуборочных комбайнов. Так, оснащение молотильного барабана гидравлическим приводом вместо ременного вариатора на зерноуборочном комбайне «Дон-1500» привело к выравниванию затрат энергии на функционирование барабана и движение комбайна и позволило повысить пропускную способность комбайна с 8,3 до 9,4 кг/с при сохранении уровня потерь зерна 1,5%.

Выводы. Современные зерноуборочные комбайны представляют собой сложную трансформируемую техническую систему, содержащую большое количество в основном активных рабочих органов, функционирующих как в одновременном, так и в последовательном режимах, а также механизмов управления и автоматических систем. Энергопотребители значительно удалены и сложно ориентированы относительно источника энергии в пространстве с размерами до 12м х 8м х 5м. Повышение потребительских свойств и качеств зерноуборочных комбайнов, а также их эксплуатационных показателей возможно на основе их комплексной гидрофикации.

Библиографический список

1. *Серый Г.Ф.* и др. Зерноуборочные комбайны. – М.: Агропромиздат, 1986.
2. *Песков Ю.А.* и др. Зерноуборочные комбайны «Дон». – М.: Агропромиздат, 1986.
3. *Шаткус Д.И.* Зерноуборочные комбайны «Енисей». – М.: Агропромиздат, 1986.
4. *Гельфенбейн С.П.* Основы автоматизации сельскохозяйственных агрегатов. – М.: Колос, 1975.
5. *Гельфенбейн С.П.* и др. Электроника и автоматика в мобильных сельскохозяйственных машинах. – М.: Агропромиздат, 1986.
6. *Настенко Н.Н.* и др. Системы автоматического регулирования зерноуборочных комбайнов. – М.: Машиностроение, 1973.

7. *Шеповалов В.Д.* Автоматизация уборочных процессов, 2-е издание, перераб. и доп. – М.: Колос, 1978.

8. Концепция развития механизации уборки зерновых культур на период до 2005 года. – М.: ВИМ, 1994.

9. *Богданович В.П.* Применение гидропривода в трансмиссиях зерноуборочных комбайнов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – №10.

Материал поступил в редакцию 07.07.08.

V.N. GELEVEROV, A.D. DIATCHENKO

PROSPECTS OF DEVELOPMENT AND APPLICATION OF AUTOMATED VOLUMETRIC HYDROMECHANICAL DRIVE FOR A COMBINE HARVESTER

The analysis of agricultural machines as objects of hydrofication is lead. The description of the device and functioning one-machine drive is given, the mathematical model, dynamics of a multiline hydraulic drive is resulted.

ГЕЛЕВЕРОВ Владимир Николаевич (р.1960), заведующий кафедрой «Автомобилестроение» филиала ДГТУ (г.Таганрог). Окончил НПИ (1988).
Область научных интересов: разработка и повышение технического уровня объемных гидромеханических передач мобильных сельскохозяйственных машин.

ДЬЯЧЕНКО Анатолий Дмитриевич (р.1950), заведующий кафедрой «Сервис и техническая эксплуатация автотранспортных средств» ДГТУ, доктор технических наук (2003). Окончил РИСХМ (1976).
Область научных интересов: разработка и повышение технического уровня объемных гидромеханических передач мобильных сельскохозяйственных машин.
Автор 95 научных работ.

УДК 631.362.001.573

Ю.И. ЕРМОЛЬЕВ, М.Ю. КОЧКИН

ФРАКЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ЗЕРНА ПРОДОВОЛЬСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Приведены основные экспериментальные исследования фракционных технологий очистки зерна пшеницы в зерноочистительном агрегате.
***Ключевые слова**: фракционная технология, экспериментальные исследования, зерно продовольственного назначения, очистка, экспериментальный зерноочистительный агрегат.*

Введение. Существующие зерноочистительные агрегаты существенно снижают эффективность функционирования при очистке зерна продовольственного назначения, когда в составе исходного зернового материала присутствуют трудноотделимые примеси, а при повышении подачи исходного зернового материала триерные блоки снижают производительность зерноочистительного агрегата до уровня собственной невысокой производительности. Для повышения качества очистки и увеличения производительности зерноочистительного агрегата прибегают к использованию параллельно работающих триерных блоков, что, естественно, приводит к существенному повышению материалоемкости, энергоемкости и росту приведенных затрат на очистку зерна.

Постановка задачи. Используя предварительные результаты моделирования процессов функционирования зерноочистительных агрегатов по фракционным технологиям [1,2], оценить эффективность функционирования экспериментального зерноочистительного агрегата (ЭЗОА) при первичной очистке зерна пшеницы и реализации в нём различных подмножеств частных технологических операций с различными взаимосвязями; выявить закономерности изменения качественных показателей очищенного зернового материала в зависимости от использования при его очистке в ЭЗОА триерного блока с различными схемами функционирования; оценить рациональную технологическую схему ЭЗОА при очистке исследуемого зернового материала.

Экспериментальный зерноочистительный агрегат и методика проведения эксперимента. Конструирование, изготовление ЭЗОА (рис.1, 2) и проведение экспериментальных исследований осуществлялось на базе зерноперерабатывающего предприятия ООО «Деметра», Аксайского района, в период 11.06.2007 по 20.08.2007 года.

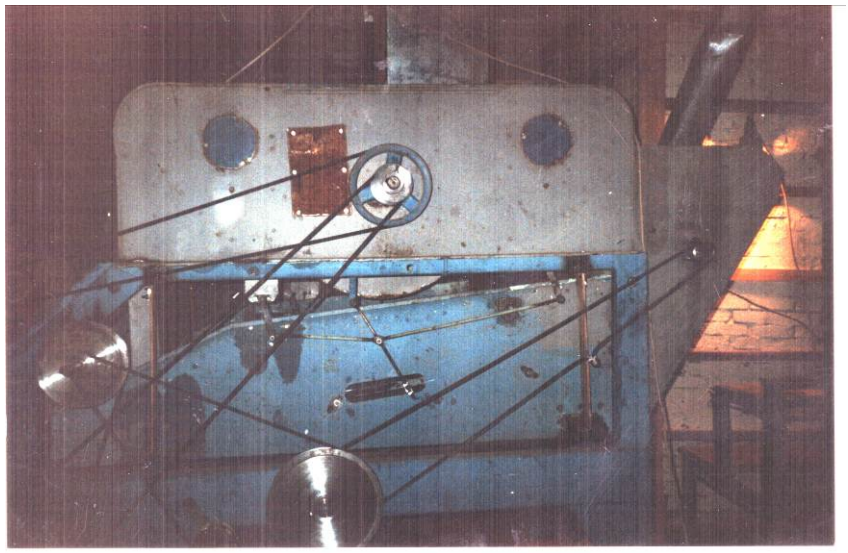


Рис.1. Общий вид зерноочистительной машины «Петкус-гигант» К-531А

Рис.2. Общий вид переоборудованного триерного блока фирмы «Петкус» К 553А

Оборудование ЭЗОА представлено в нижеприведенной таблице.

№	Наименование и марка	Кол.	Технические характеристики		Примечание
			Установ. мощность дв., кВт	Производ, т/ч, (кг/с)	
1.	Зерноочистительная машина «Петкус-Гигант» К-531А, Германия	1	4,0	2,5(0,69)	Отсутствует триерная приставка, добавлен лоток для мелкого сора
2.	Триерный блок К-553А, Германия	1	4,0	0,35(0,09)	Отсутствуют средние цилиндры, загрузка кук. и овс. цилиндров раздельная
3.	Нория НПЗ-10	1	0,8	10(2,77)	Стандартная
4.	Нория НПЗ-10	2	0,8	10(2,77)	Добавление загрузочного бункера
5.	Комплект зернопроводов	1	-	-	Оригинальный
6.	Пульт управления	1	-	-	Оригинальный

Испытания ЭЗОА проводили в соответствии с ГОСТ 12042-80 в режиме первичной очистки, по трем технологическим схемам (одна простая последовательная и две фракционные (рис.3,а,б)). Отбор проб и выделение репрезентативных навесок проводились в соответствии с ГОСТ 12036-85, 13586.3-83. Исследование их проводили по известным методикам [3] на базе лаборатории сепарации кафедры «Сельскохозяйственные машины и оборудование» ДГТУ. Повторность опытов трехкратная. Вычисляли на ЭВМ по известным методикам [1] содержание j-го компонента (Aj), чистоту очищенного материала (Апо), содержание сорных (Всп) и зерновых (Взп) примесей в очищенном зерне пшеницы, потери зерна пшеницы в неиспользуемые отходы (Пно), выход зерна пшеницы в используемые отходы (Вио).

В качестве исходного зернового материала взята яровая пшеница (сорт «Зерноградская 11 »), поступившая из бункера зерноуборочного комбайна Дон-1500Б при её уборке. Содержание j-х компонентов: зерно пшеницы-85,79%, соломистые примеси-0,55%, крупные примеси-2,20%, зерновые примеси (щуплое зерно)-4,78%, сорные примеси-2,79%, дробленое зерно-3,48%, семена сорных растений-0,40%. Влажность 13,8%, натура 715,4 г/л. Размеры зерен: длина l=6,1 мм; σ_l^2=0,778; ширина b=2,9 мм; σ_b^2 = 0,736; толщина c = 2,5 мм; σ_c^2 = 0,825. Варьирование подачи зернового материала (т/ч) в приемный бункер ЗОМ «Петкус-Гигант» К 531А: 0,3; 0,6; 1; 2; 3.

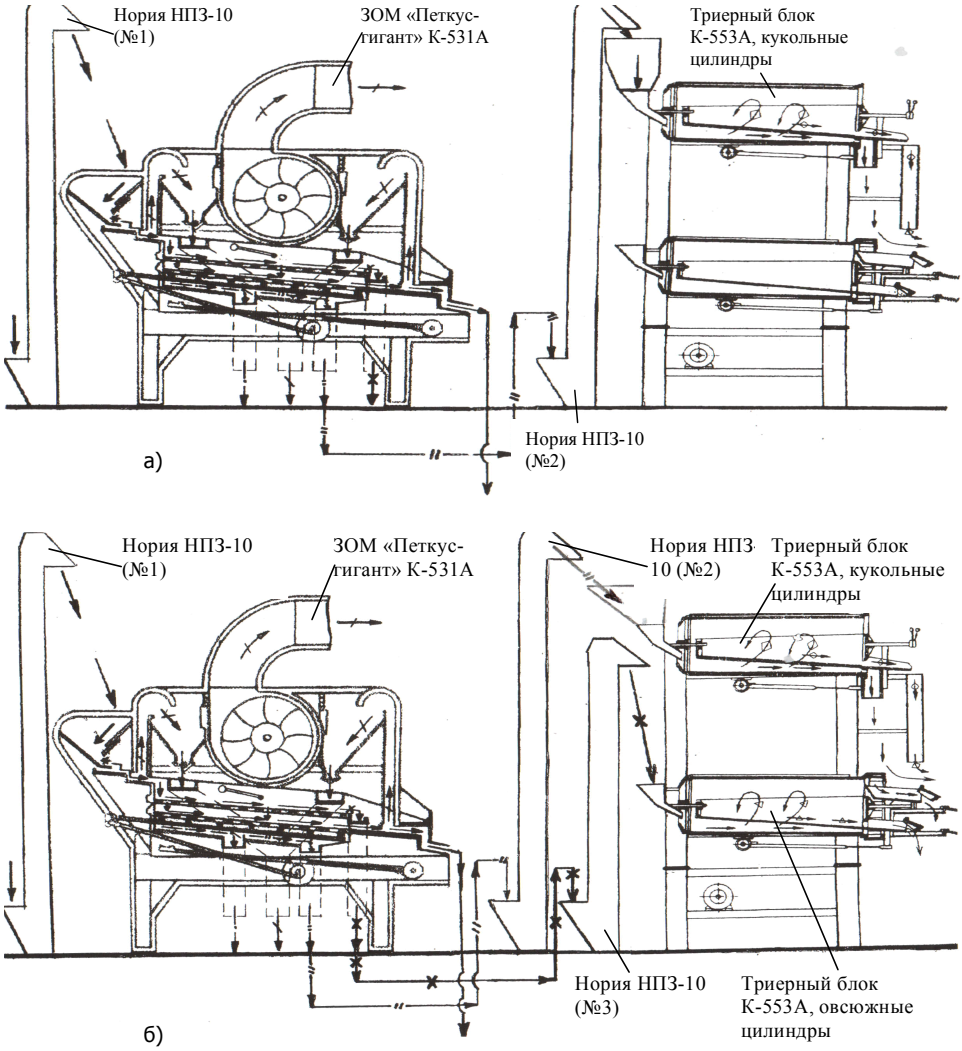


Рис. 3. Функциональные схемы: а – схема №2; б– схема №3; поток обрабатываемой культуры ; крупные примеси ; легкие примеси ; мелкое зерно и фуражные отходы ; мелкие примеси ; очищенное зерно ЗОМ) ; очищенное зерно (тр. блок, овс. цил.) , длинные примеси (тр. блок, овс. цил.) , мелкое очищенное зерно (тр. блок, кук. цил) , короткие примеси (тр. блок, кук. цил)

Описание вариантов технологических схем функционирования ЭЗОА. *Первая технологическая схема ЭЗОА* реализует очистку зернового материала только в зерноочистительной машине (ЗОМ) «Петкус-Гигант» К-531А, используя норию НПЗ-10, комплект зернопроводов и пульт управления. Настройка рабочих органов агрегата проведена в соответствии с инструкцией. Размеры отверстий решет ЗОМ «Петкус-Гигант» К 531А: верхний ярус- □ 3,0; □ 3,4; нижний ярус - □ 1,7; □ 2,0. Угол наклона решетного стана равен 8°50´; частота колебаний решетного стана 480 мин$^{-1}$; амплитуда колебаний решетного стана 9 мм; частота вращения вентилято-

ра при очистке зерна пшеницы 850 мин$^{-1}$. Очистка зернового материала проводится по обычной технологии ЗОМ «Петкус-Гигант» К 531-А.

Вторая технологическая схема ЭЗОА – фракционная схема очистки зерна с доочисткой в кукольном цилиндре мелкой зерновой фракции, выделенной в проход под второе нижнее решето ЗОМ, – включает ЗОМ «Петкус-Гигант» К-531А, кукольный цилиндр триерного блока К-553А, две нории НПЗ-10, комплект зернопроводов и пульт управления (см. рис.3, а).

Характеристики рабочих органов агрегата: размеры отверстий решет ЗОМ «Петкус-Гигант» К-531А: верхний ярус- □ 3,0; □ 3,4; нижний ярус – первое решето □ 1,7, второе фракционное □ 2,6. Угол наклона решетного стана равен 8°50´; частота колебаний решет 480 мин$^{-1}$; амплитуда колебаний решетного стана 9 мм. Частота вращения вентилятора при очистке зерна пшеницы 850 мин$^{-1}$. Размеры ячеек кукольного цилиндров триерного блока К-553А: кукольные цилиндры - Ø 4,0; цилиндры наклонены под углом 1°30´; частота вращения 33 мин$^{-1}$; диаметр 475 мм; длина 1290 мм.

Исходный зерновой материал из загрузочного бункера нории №1 подается в приемный бункер ЗОМ «Петкус-Гигант» К-531А. После первого пневмосепаратора зерновой материал поступает на верхний решетный ярус, на котором отделяются крупные примеси. Проход верхнего решетного яруса поступает на первое нижнее решето, на котором выделяются мелкие примеси, далее зерновой материал попадает на второе нижнее решето – фракционер, где выделяются мелкое зерно с фуражными отходами. Чистое зерно идет сходом с нижнего решетного яруса в выходной лоток (очищенное зерно).

Мелкое зерно с фуражными отходами (составляют в среднем 15-17% от подачи зернового материала в приемный бункер ЗОМ «Петкус-Гигант» К-531А и содержат в среднем 70-80% мелкого зерна пшеницы) с помощью нории №2 поступает в приемный бункер кукольных цилиндров триерного блока К 553А, в которых из этой зерновой фракции отделяются короткие примеси и выводятся из триера. Очищаемое мелкое зерно движется сходом по внутренней поверхности цилиндров в выходную воронку (очищенное зерно).

Третья технологическая схема – фракционная схема очистки зерна с раздельной доочисткой мелкой фракции (проход под второе нижнее решето) только в кукольных, а крупной фракции (сход с верхних решет) – только в овсюжных триерных цилиндрах (рис. 3,б). Включает ЗОМ «Петкус-Гигант» К-531А, триерный блок К-553А, три нории НПЗ-10, комплект зернопроводов и пульт управления.

Характеристики рабочих органов агрегата: размеры отверстий решет ЗОМ «Петкус-Гигант» К-531А: верхний ярус - □ 3,0; □ 3,2; нижний ярус - □ 1,7; □ 2,6. Угол наклона решетного стана равен 8°50´; частота колебаний решет 480 мин$^{-1}$; амплитуда колебаний решетного стана 9 мм; частота вращения вентилятора при очистке зерна пшеницы 850 мин$^{-1}$. Размеры ячеек кукольного и овсюжного цилиндров триерного блока К-553А: кукольные цилиндры - Ø 4,0; овсюжные цилиндры - Ø 8,5. Цилиндры наклонены под углом 1°30´; частота вращения 33 мин$^{-1}$; диаметр 475 мм; длина 1290 мм.

Исходный зерновой материал из загрузочного бункера нории №1 подается в приемный бункер ЗОМ «Петкус-Гигант» К-531А. После первого пневмосепаратора зерновой материал поступает на верхний решетный ярус, с уменьшенными размерами отверстий решет, сход с которого содержит крупное зерно крупные (длинные) примеси, поступает в норию №3. Проход верхнего решетного яруса поступает на первое нижнее решето, на котором выделяются мелкие примеси, далее зерновой материал попадает на второе нижнее решето – фракционер, где выделяются мелкое зерно и фуражные отходы, которые, как во второй технологической схеме, доочищаются в кукольных триерных цилиндрах, разделяющих эту фракцию на очищенное мелкое зерно и фуражные отходы.

Чистое зерно идет сходом с нижнего решетного яруса в выходной лоток. Сход с верхнего решетного яруса составляет в среднем 5-7% от подачи зернового материала в приемный бункер ЗОМ «Петкус-Гигант» К-531А и содержит в среднем 80-90% крупного зерна пшеницы. Эта фракция после нории №3 делится на два потока 55% и 45% (соответственно цилиндр №1 и цилиндр №2) и попадает в овсюжные цилиндры триерного блока К-553А, где из неё отделяются и выводятся из триера длинные примеси. Крупное очищенное зерно выводится из триерного блока в очищенную фракцию.

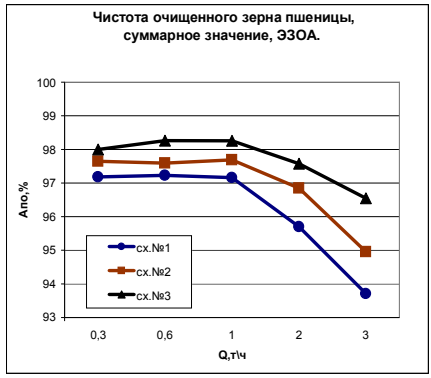
Результаты экспериментальных исследований, обработанные по известным методикам [3], приведены на рис.4, а-д.

Установлено, что чистота зерна пшеницы (рис.4, а), очищенного в агрегате при варьировании подачи в ЭЗОА с 0,3 до 3 т/ч, изменялась следующим образом: схема №1(97,18 - 97,23 - 97,16 - 95,7 - 93,71%); схема №2 (97,64 - 97,60 - 97,69 - 96,25 - 94,96%); схема №3 (97,99 - 98,26 - 98,25 - 97,57 - 96,58%).

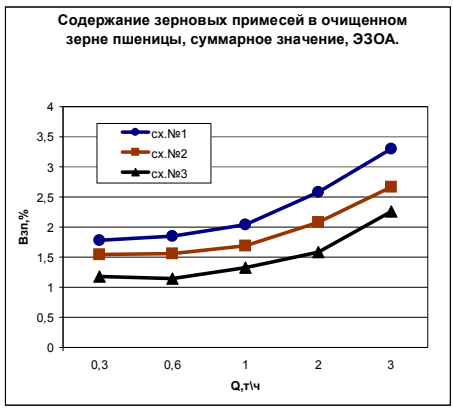
По данным статистического анализа, с доверительной вероятностью 0,95, различия показателей чистоты очищенного зерна пшеницы (суммарное значение, ЭЗОА),для различных технологий очистки являются статистически значимыми.

Содержание сорных примесей (рис.4, б) в очищенном агрегатом зерне пшеницы при варьировании подачи в ЭЗОА с 0,3 до 3 т/ч изменялось: схема №1 (1,03 - 0,92 - 0,8 - 1,72 - 3,00%); схема №2 (0,82 - 0,86 - 0,63 - 1,08 - 2,39%); схема №3 (0,84 - 0,60 - 0,42 - 0,83 - 1,20%). По данным статистического анализа, различия показателей содержания сорных примесей в очищенном зерне пшеницы (суммарное значение, ЭЗОА), являются статистически значимыми, кроме разницы между схемой №1 и №2 при подаче 0,6 т/ч, между схемой №2 и №3 при подаче 0,3 т/ч.

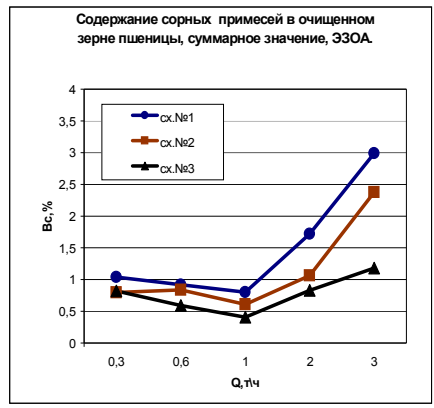
Содержание зерновых примесей (рис.4, в) в очищенном агрегатом зерне пшеницы при варьировании подачи в ЭЗОА с 0,3 до 3 т/ч изменялось: схема №1 (1,79 - 1,84 - 2,04 - 2,58 - 3,29%); схема №2 (1,56 - 1,59 - 1,74 - 2,14 - 2,69%); схема №3 (1,19 - 1,17 - 1,38 - 1,63 - 2,29%). По данным статистического анализа, различия показателей содержания зерновых примесей в очищенном зерне пшеницы (суммарное значение, ЭЗОА), являются статистически значимыми, кроме разницы между схемой №1 и №2 при подаче 0,3 т/ч.



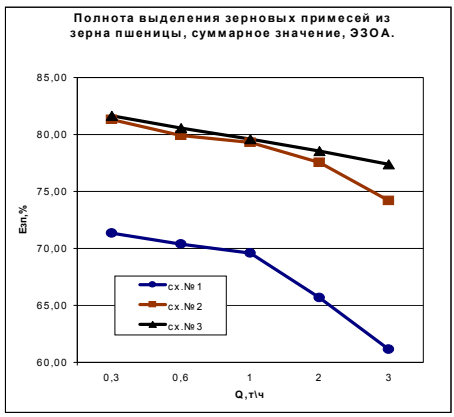
а)



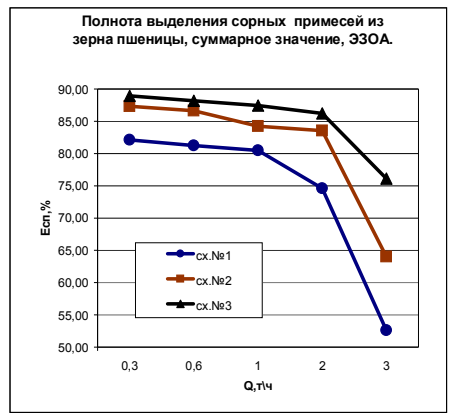
б)



в)



г)



д)

Рис.4. Основные результаты экспериментальных исследований: а – чистота очищенного в агрегате зерна пшеницы; б – содержание сорных примесей в очищенном агрегатом зерне пшеницы; в – содержание зерновых примесей в очищенном агрегатом зерне пшеницы; г – полнота выделения сорных примесей из зерна пшеницы; д – полнота выделения зерновых примесей из зерна пшеницы

Полнота выделения сорных примесей (рис.4, г) из зерна пшеницы при варьировании подачи в ЭЗОА с 0,3 до 3 т/ч изменялась: схема №1 (82,12 - 81,23 - 80,49 - 74,61 - 52,61%); схема №2 (87,34 - 86,63 - 84,23 - 83,54 - 64,01%); схема №3 (88,95 - 88,17 - 87,44 - 86,21 - 76,13%). По данным статистического анализа, различия показателей содержания зерновых примесей в очищенном зерне пшеницы (суммарное значение, ЭЗОА), являются статистически значимыми, кроме разницы между схемой №2 и №3 при подаче 0,3 т/ч.

Полнота выделения зерновых примесей (рис.4, д) из зерна пшеницы при варьировании подачи в ЭЗОА с 0,3 до 3 т/ч изменялась: схема №1 (71,34 - 70,37 - 69,59 - 65,68 - 61,14%); схема №2 (81,31 - 79,91 - 79,30 - 77,55 - 74,19%); схема №3 (81,64 - 80,56 - 79,60 - 78,55 - 77,39%). По данным статистического анализа, различия показателей содержания зерновых примесей в очищенном зерне пшеницы (суммарное значение, ЭЗОА), являются статистически значимыми, кроме разницы между схемами №2 и №3 при подачах 0,3, 0,6 и 1 т/ч.

Выводы. Экспериментальные исследования подтвердили предварительный вывод о функциональной эффективности фракционных технологий очистки зерна продовольственного назначения. Выявлено, что за счет фракционирования зернового материала в воздушно-решетной зерноочистительной машине чистота очищенного в ней зерна выше при равных подачах, чем при используемой технологии очистки на 0,5 и 1% (схемы №2 и №3 соответственно), а при равной чистоте очищенного зерна допустимая подача зернового материала возрастает на 210 и 280% (с 0,25 до 0,52 кг/с и 0,72 кг/с, схемы №2 и №3 соответственно).

Установлено, что использование раздельно функционирующих кукольных и овсюжных триерных цилиндров существенно снижает в них удельную нагрузку, что обеспечивает качественную очистку раздельных фракций мелкого зерна (чистота 98,50 %) и фракции крупного зерна (чистота 99,05%). Совокупная чистота очищенного в агрегате по фракционной технологии (схема №3) зерна выше, чем при обычной последовательной схеме его очистки на 1,53% (схема №1) и на 0,75% (схема №2), при этом выявлен рост производительности агрегата на 210 и 280% (схемы №2 и №3 соответственно), по сравнению со схемой №1.

Библиографический список

1. *Ермольев Ю.И.* Технологические основы интенсификации процесса сепарации зерна воздушнорешетными зерноочистительными машинами и агрегатами: дис. … д-ра техн. наук. – Ростов н/Д, 1990.

2. *Ермольев Ю.И.* Моделирование процесса функционирования зерноочистительного агрегата / Ю.И.Ермольев, М.Ю.Кочкин // Вестник ДГТУ. – Т.7. – №4(35). – Ростов н/Д, 2007. – С.407-417.

3. *Ермольев Ю.И.* Основы научных исследований в сельскохозяйственном машиностроении: учеб. пособие / Ю.И. Ермольев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – С.52-67.

Материал поступил в редакцию 15.07.08.

U.I. ERMOLJEV, M.U. KOCHKIN

FRACTIONAL TECHNOLOGIES OF A FOOD GRAIN CLEANING.

An experimental research of fractional technologies of a food grain cleaning is executed and theirs principal results are given.
Key words: fractional technology, experimental research, food grain, cleaning, experimental cleaning grain unit.

ЕРМОЛЬЕВ Юрий Иванович (р.1943), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины и оборудование» ДГТУ. Окончил РИСХМ (1969).
Научные интересы: решение проблемы системной сепарации сыпучих гетерогенных сред сельскохозяйственного назначения, направленной на создание новых современных технологий и технических средств для поточной сепарации зерновых и других сельхозматериалов.
Имеет более 200 научных публикаций (в т.ч. три монографии).

КОЧКИН Максим Юрьевич (р.1981), аспирант кафедры «Сельскохозяйственные машины и оборудование» ДГТУ. Окончил ДГТУ в 2004 году.
Специалист в области сепарации сыпучих сред.

УДК 631.354.62-310

В.В. РАДИН, С.В. КУРУЧУК, М.С. ГНУТОВ

К ВОПРОСУ О НЕГОЛОНОМНОЙ СВЯЗИ В ПРИВОДЕ МОЛОТИЛЬНОГО БАРАБАНА ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА В РЕЖИМЕ РАЗГОНА

Получены уравнения неголономной связи второго порядка, которая проявляет свои свойства при включении леникной гибкой передачи в приводе молотилки зерноуборочного комбайна. Выделены три фазы работы леникной передачи при включении, и для каждой фазы получены уравнения связи. Обобщенное уравнение связи объединяет все три фазы работы и является нелинейной неголономной связью второго порядка.

Ключевые слова: *неголономная связь, динамика системы, гибкая передача, комбайн.*

Введение. В данной работе получены уравнения неголономной связи второго порядка, имеющей место в приводе молотильного барабана зерноуборочного комбайна в периоды разгона рабочих органов.

Для обоснования типа неголономной связи схематизируем реальный процесс разгона, положив в основу типовую осциллограмму процесса разгона молотильного барабана (сплошная линия $\omega_б$, рис. 1).

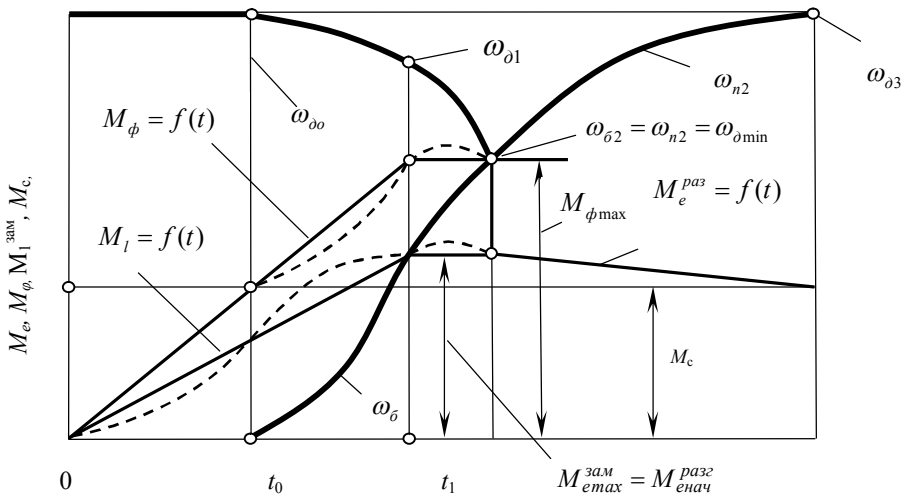


Рис. 1. Осциллограмма процесса разгона рабочих органов комбайна

Из этой осциллограммы видно, что крутящий момент $M_ф$, передаваемый леникной клиноременной передачей при включении привода рабочих органов комбайна, непрерывно увеличивается во времени t. Закон его изменения в основном является следствием темпа включения передачи. Как показал анализ осциллограмм, при равномерном включении леникной передачи крутящий момент $M_ф = f(t)$, передаваемый ею, возрас-

тает по линейному закону. Такая идеализация несущественно отличается от реального процесса (см. пунктирную линию $M_ф$ на рис.1).

К концу периода включения передачи t_1 крутящий момент, передаваемый лениксной передачей, достигнет наибольшего значения:

$$M_{фmax} = \beta M_{ер},$$

где β – коэффициент запаса крутящего момента лениксной передачи;

$M_{ер}$ – расчетный крутящий момент двигателя комбайна.

Методика аналитического исследования неголономной связи в приводе молотильного барабана. Уравнения движения двухмассовой системы, составленной из двигателя с лениксной передачей и контрпривода вала главного, имеют следующий вид:

$$M_ф = M_e^{зам} + I_1\ddot{\varphi}_1, \quad (1)$$

$$M_ф = M_c + I_2\ddot{\varphi}_2, \quad (2)$$

где M_c – крутящий момент сил сопротивления на валу главного контрпривода в период замыкания лениксной передачи; I_1 – момент инерции на валу двигателя; I_2 – момент инерции молотилки, приведенный к валу контрпривода; $\ddot{\varphi}_1$ – угловое ускорение вала двигателя; $\ddot{\varphi}_2$ – угловое ускорение вала контрпривода; $M_e^{зам}$ – максимальный крутящий момент двигателя в момент замыкания лениксной передачи.

Воспользуемся уравнением (1) для определения угловой скорости ω_1 коленчатого вала двигателя:

$$\omega_1 = -\int_0^{t_1} \frac{M_ф - M_e^{зам}}{i_1} dt \cdot \quad (3)$$

Поскольку $M_ф = \beta M_{ер}$, а максимальный крутящий момент, развиваемый лениксной передачей в период разгона $M_{емакс}^{зам} = kM_{ер}$, то на основании схематизированной осциллограммы реального процесса включения лениксной передачи получаем:

$$\omega_1 = -\int_0^{t_1} \frac{\beta M_{ер} - kM_{ер}}{i_1} \times \frac{t}{t_1} dt = -\frac{M_{ер}(\beta - k)^{t1}}{i_1 t_1} \int_0^{t_1} t dt = -\frac{M_{ер}(\beta - k)t^2}{2i_1 t_1} + C \cdot \quad (4)$$

Здесь в начальный момент (t=0) $\omega_1 = \omega_{1xx}$, где ω_{1xx} – угловая скорость холостого хода двигателя, тогда $C = \omega_{1xx}$. Подставив значение C в выражение (4), получим:

$$\omega_1 = \omega_{1xx} \frac{M_{ер}(\beta - k)t^2}{2I_1 t_1} \cdot \quad (5)$$

Угловая скорость коленчатого вала в конце периода включения передачи, т.е. при $t = t_1$, равна:

$$\omega_{11} = \omega_{1xx} \frac{M_{ер}(\beta - k)t_1}{2I_1} \quad . \quad (6)$$

В период от t_1 до t_2 (см. рис.1) разность

$$M_{фмакс} - M_{емакс}^{зам} = (\beta - k) M_{ер} = const,$$

и угловая скорость коленчатого вала двигателя определяется по выражению:

$$\omega_1 = -\int_{t_1}^{t_2} \frac{(\beta - k) M_{ер}}{I_1} dt = -\frac{(\beta - k) M_{ер}}{I_1} t \Bigg|_{t_1}^{t_2} + C_1. \quad (7)$$

При $t = t_1$ $\omega_1 = \omega_{11}$, $C_1 = \omega_{11} + \frac{(\beta - k) M_{ер} t_1}{I_1}$, и выражение (7) принимает вид:

$$\omega_1 = \omega_{11} - \frac{(\beta - k) M_{ер} t}{I_1} + \frac{(\beta - k) M_{ер} t_1}{I_1}. \quad (8)$$

Подставляя в формулу (8) значение ω_{11} из выражения (6), получаем:

$$\omega_1 = \omega_{1xx} - \frac{(\beta - k) t}{I_1} + \frac{M_{ер} (\beta - k) t_1}{2 I_1}. \quad (9)$$

Используя выражение (2) и имея в виду, что $M_ф = \beta M_{ер} \frac{t}{t_1}$ и $M_e = k_3 M_{ер}$, определим угловую скорость ведомого вала в период от t_0 до t_1 (рис. 1):

$$\omega_2 = \int \frac{\beta M_{ер} t}{I_2 t_1} dt - \int \frac{k_3 M_{ер}}{I_2} dt = \frac{\beta M_{ер}}{2 I_2 t_1} t^2 - \frac{k_3 M_{ер}}{I_2} + C_2, \quad (10)$$

где $k_3 = \frac{M_e}{M_{ер}}$ – коэффициент загрузки двигателя; M_e – текущее значение крутящего момента, развиваемого двигателем.

При $t = t_0$, когда $\omega_2 = 0$, из выражения (10) определяется C_2. Следовательно,

$$\omega_2 = \frac{\beta M_{ер}}{2 I_2 t_1} \left(t^2 - t_0^2 \right) - \frac{k_3 M_{ер}}{I_2} (t_1 - t_0). \quad (11)$$

Угловая скорость ведомого вала контрпривода главного в момент времени $t = t_1$ будет равна:

$$\omega_{21} = \frac{\beta M_{ер}}{2 I_2 t_1} \left(t_1^2 - t_0^2 \right) - \frac{k_3 M_{ер}}{I_2} (t_1 - t_0). \quad (12)$$

Подставив в выражение (12) значение

$$t_0 = \frac{M_c t_1}{M_{фмакс}} = \frac{k_3 M_{ер} t_1}{\beta M_{ер}} = \frac{k_3 t_1}{\beta},$$

получим:

$$\omega_{21} = \frac{\beta M_{ep}}{2 I_2 t_1}\left[t_1^2 - \left(\frac{k_3 t_1}{\beta}\right)\right] - \frac{k_3 M_{ep}}{I_2}\left[t_1\left(\frac{k_3 t_1}{\beta}\right)\right] = \frac{M_{ep} t_1}{2 I_2 \beta}\left(\beta - k_3\right)^2. \quad (13)$$

Угловую скорость вала главного контрпривода для любого момента времени после окончания периода включения можно определить по формуле:

$$\omega_2 = \int \frac{M_{фмакс} - M_c}{I_2} dt = \frac{M_{ep}\left(\beta - k\right)}{I_2} t + C_3 .$$

При $t = t_1$, $\omega_2 = \omega_{21}$ и, следовательно,

$$C_3 = \omega_{21} - \frac{M_{ep}\left(\beta - k_3\right) t_1}{I_2},$$

тогда

$$\omega_2 = \omega_{21} + \frac{M_{ep}\left(\beta - k_3\right)}{I_2}\left(t - t_1\right) . \quad (14)$$

Известно [4], что неголономная связь клиноременной передачи определяется уравнением вида:

$$f\left(t, \dot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_1\right) = \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1 i_0 \left(1 - \varepsilon_n\right) = 0 , \quad (15)$$

где $\dot{\varphi}_1$ – угловая скорость ведущего вала; $\dot{\varphi}_2$ – угловая скорость ведомого вала леникcной передачи; ε_n – полное скольжение леникcной передачи; i_0 – расчетное передаточное отношение леникcной передачи.

Полное скольжение леникcной передачи можно представить в виде:

$$\varepsilon_n = 1 - \frac{\dot{\varphi}_2}{\dot{\varphi}_1 i_0} . \quad (16)$$

Найдем значение полного скольжения для каждого периода разгона клиноременной передачи. Для этого подставим в выражение (16) значения угловых скоростей ведущего и ведомого валов. Полное скольжение в клиноременной передаче в период времени от t=0 до t=t_1 определяем по формуле:

$$\varepsilon_n = 1 - \frac{\frac{\beta M_{ep}}{2 I_2}\left(t^2 - t_0^2\right) - \frac{k_3 M_{ep}}{I_2}\left(t - t_0\right)}{\left(\omega_{1xx} - \frac{M_{ep}\left(\beta - k\right) t^2}{2 I_1 t_1}\right) i_0} . \quad (17)$$

Скольжение в передаче в момент времени $t = t_1$ будет равно:

$$\varepsilon_n = 1 - \frac{\frac{M_{ep} t_1}{2 I_2 \beta}\left(\beta - k_3\right)^2}{\left(\omega_{1xx} - \frac{M_{ep}\left(\beta - k\right) t_1}{2 I_1}\right) i_0} . \quad (18)$$

Скольжение в передаче в период времени от $t = t_1$ до $t = t_2$ определяем по выражению:

$$\varepsilon_n = 1 - \frac{\dfrac{M_{ep}t_1}{2I_2\beta}\left(\beta - k_3\right)^2 + \dfrac{M_{ep}\left(\beta - k_3\right)}{I_2}\left(t - t_1\right)}{\left[\omega_{1xx} - \dfrac{M_{ep}\left(\beta - k\right)}{I_1}\left(t - \dfrac{t_1}{2}\right)\right] i_0}. \qquad (19)$$

Подставляя полученные значения скольжений в уравнение связи (15), получаем для каждого периода работы леникcной передачи в процессе разгона следующие уравнения:

для периода времени от $t = 0$ до $t = t_1$:

$$f\left(t, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}_1\right) = \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1 \left[\frac{\dfrac{M_{ep}\beta}{2I_2 t_1}\left(t^2 - t_0^2\right) - \dfrac{k_3 M_{ep}}{I_2}\left(t - t_0\right)}{\left(\omega_{1xx} - \dfrac{M_{ep}\left(\beta - k\right)t_1}{2I_1}\right) i_0} \right] = 0; \quad (20)$$

для момента времени $t = t_1$:

$$f\left(t, \dot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}\right) = \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1 \left[\frac{\dfrac{M_{ep}t_1}{2I_2\beta}\left(\beta - k_3\right)^2}{\left(\omega_{1xx} - \dfrac{M_{ep}\left(\beta - k\right)t_1}{2I_1}\right) i_0} \right] = 0; \qquad (21)$$

для периода времени от $t = t_1$ до $t = t_2$:

$$f\left(t, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}_1\right) = \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1 \left[\frac{\dfrac{M_{ep}t_1}{2I_2\beta}\left(\beta - k_3\right)^2 + \dfrac{M_{ep}\left(\beta - k_3\right)}{I_2}\left(t - t_1\right)}{\left[\omega_{1xx} - \dfrac{M_{ep}\left(\beta - k\right)t_1}{I_1}\left(t - \dfrac{t_1}{2}\right)\right] i_0} \right] = 0. \quad (22)$$

Учитывая, что $M_{ep} = i_1\ddot{\varphi}_1$, выносим за скобки ускорение коленчатого вала двигателя $\ddot{\varphi}_1$ и получаем обобщенное уравнение леникcной передачи как неголономной связи 2-го порядка:

$$f\left(\dot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_1, t\right) = \dot{\varphi}_2 - \ddot{\varphi}_1 \left[\frac{K_1(t)\ddot{\varphi}_1}{\omega_{1xx} - K_2(t)\ddot{\varphi}_1 \rceil i_0} \right] = 0, \qquad (23)$$

где $K_1(t)$ и $K_2(t)$ – коэффициенты, зависящие от параметров леникcной передачи, начальных условий и времени.

Анализ интегрируемости уравнений (20)-(23) установил, что они не могут быть разрешены в квадратурах.

Выводы:

1. В результате выполненного анализа с учетом реального процесса разгона привода молотильного барабана зернокомбайна с помощью леникcной передачи и принятой его идеализации установлено, что нелинейное относительно $\ddot{\varphi}_1$ дифференциальное уравнение (23) является уравнением нелинейной неголономной связи второго порядка, характеризующим свойства леникcной передачи комбайна в период разгона молотилки.

2. До настоящего времени у исследователей неголономных систем нет единого мнения по поводу обобщенных вариаций, допускаемых связями типа (23), а следовательно, требуется произвести дополнительный анализ методов построения аналитических моделей движения подобных механических систем с помощью дифференциальных принципов механики, не выводящих их движение за механику Ньютона.

3. В приводах сложных машин, подобных зерноуборочному комбайну, работающих в динамических режимах с переменными нагрузками на кинематические трансляторы, любые передачи, допускающие невосполнимые отставания кинематических режимов, ведомых элементов приводов от ведущих, способны проявлять свойства неголономных связей второго порядка.

Библиографический список

1. *Алферов С.А.* Динамика зерноуборочного комбайна / С.А. Алферов. – М.: Машиностроение, 1973. – 255 с.

2. *Болтинский В.Н.* Разгон машинно-тракторных агрегатов на повышенных скоростях // Механизация и электрификация социалистического хозяйства. – 1961. - №3. – С.1-9.

3. *Зельцерман И.М.* Фрикционные муфты и тормоза гусеничных машин / И.М.Зельцерман, Д.М.Каминский, А.Д. Онопко. – М.: Машиностроение, 1965. – 240 с.

4. *Радин В.В.* Динамика сложных машин как неголономных систем (на примере зерноуборочного комбайна) / В.В. Радин, В.А.Бураков / РГАСХМ ГОУ. – Ростов н/Д., 2003. – 150 с.

Материал поступил в редакцию 04.07.08.

V.V. RADINA, M.S.GNUTOVA, S.V.KURUCHUK'S PAPERS

TO A PROBLEM ON A NONHOLONOMIC CONSTRAINT IN A DRIVE OF A BEATER DRUM OF THE GRAIN COMBINE IN AN ACCELERATION CONDITION

In paper the equations of a nonholonomic constraint of the second order which exhibits the properties at turning on lenix a flexible drive in a drive of a thrasher of the grain combine are gained. For a justification of type of a nonholonomic constraint the oscillogram of real processes of acceleration of a thrasher is used.

It is displayed, that the accepted schematization of real process of turning on lenix-transmissions incidentally differs from it.
Three phases of operation lenix-transmissions are selected at turning on and for each phase constraint equations are gained. The generalised constraint equation merges all three phases of operation and is a nonlinear nonholonomic constraint of the second order. Outputs contain assay values of the gained differential equation on integrability and confirm, that connection is nonlinear to nonholonomic the second order.

РАДИН Виктор Викторович (р.1939), заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины» РГАСХМ, доктор технических наук (1991), профессор (1992). Окончил РИСХМ (1962).
Область научных интересов: динамика приводов сложных сельскохозяйственных машин.
Автор 125 публикаций.

ГНУТОВ Максим Сергеевич (р.1981), аспирант РГАСХМ, ведущий инженер фирмы «Аскон-Ростов».
Имеет три научные публикации.

КУРУЧУК Сергей Владимирович (р.1982), инженер-конструктор ОАО «Завод Ростсельмаш».
Научные интересы: динамика приводов зерноуборочных машин.
Имеет четыре научные публикации.

УДК 631.362.001.573

Ю.И.ЕРМОЛЬЕВ, А.И.МАРТЫНЕНКО, А.В.БУТОВЧЕНКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ ЗЕРНА В ВОЗДУШНО-РЕШЁТНОЙ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ

Построена адекватная математическая модель процесса функционирования воздушно-решётной зерноочистительной машины с многоярусными решётными модулями.
Ключевые слова: *воздушно-решётная зерноочистительная машина, процесс сепарации, математическая модель.*

Введение. Тенденция минимизации затрат на семенную очистку зерна и снижение при этом количества транспортных операций определила необходимость создания воздушно-решётных зерноочистительных машин с решётными модулями, обеспечивающими сепарацию зерна на двух последовательных модулях. Такая структура воздушно-решётных машин требует развития методологии моделирования процессов сепарации зерна в этих машинах для возможной реализации их структурно-параметрического синтеза.

Теоретическое обоснование. Математическую модель процесса сепарации зернового материала (ЗМ) воздушно-решетной зерноочистительной машины типа МВУ-1500 (ВРМ) (рис.1, 2) как замкнутой квазистатичной системы с заданной $\kappa_{\delta M}$-й функциональной схемой, в общем виде можно записать:

$$\mathrm{E}_{\phi} = \left\{F_{BPM}, A_{BPM}, G_{\delta}\left[k_{\delta M}(x), T_{\delta M}(x)\right]\right\}_{j} \to \max \quad \text{(функция цели);} \tag{1}$$

$$\vec{A}_M \subset \vec{A}_M, \quad \vec{F} \subset \vec{F}, \quad x \in G_M\left(x,u\right); \tag{2}$$

$$в_j \le \left[в_j\right], \quad \delta_э \le \left[\delta_э\right]. \tag{3}$$

Здесь $\vec{F} = \vec{F}_{BPM}$ - вектор входных воздействий на принятую в ВРМ систему операций (см. рис.1, 2), где Q - подача ЗМ в ВРМ; a_j, W - содержание в исходном ЗМ j-х компонентов, их влажность; $M\left(b_j\right)$ - математические ожидания размеров признаков разделения j-х компонентов; $f_Q(B)$ - плотность вероятности распределения подачи Q ЗМ по ширине В рабочих органов зерноочистительных машин; $\vec{A}_i$ - векторы управляющих факторов элементов ВРМ, обеспечивающих ее функционирование ($\vec{A}_{ПС1}$ и $\vec{A}_{ПС2}$ - 1-го и 2-го пневмосепаратора; $\vec{A}_{РМП}$ и $\vec{A}_{РМВ}$ - 1-го и 2-го решетного модуля) (см. рис.1), где $B_П, S_П$ - ширина и глубина пневмосепаратора ВРМ; $V_в$ - рабочая скорость воздушного потока; плотность вероятностей распределения подачи $f_Q(B_п)$ ЗМ и воздушного потока $f_v(B_п)$ по ширине $B_п$ пневмосепаратора; T_1, l_i, B_i, C - тип, длина, ширина i-го решета и количество решет в решетных модулях; b_{0i} - рабочий размер отверстий в i-м решете; α, β, R, n - угол наклона решет, направленность их колебаний, амплитуда и частоты их колебаний; $k_{\mu}\left(x\right)$ - схема расположения решет в решетных модулях; $K_{\delta M}\left(x\right)$ - функциональная схема и параметры ВРМ.

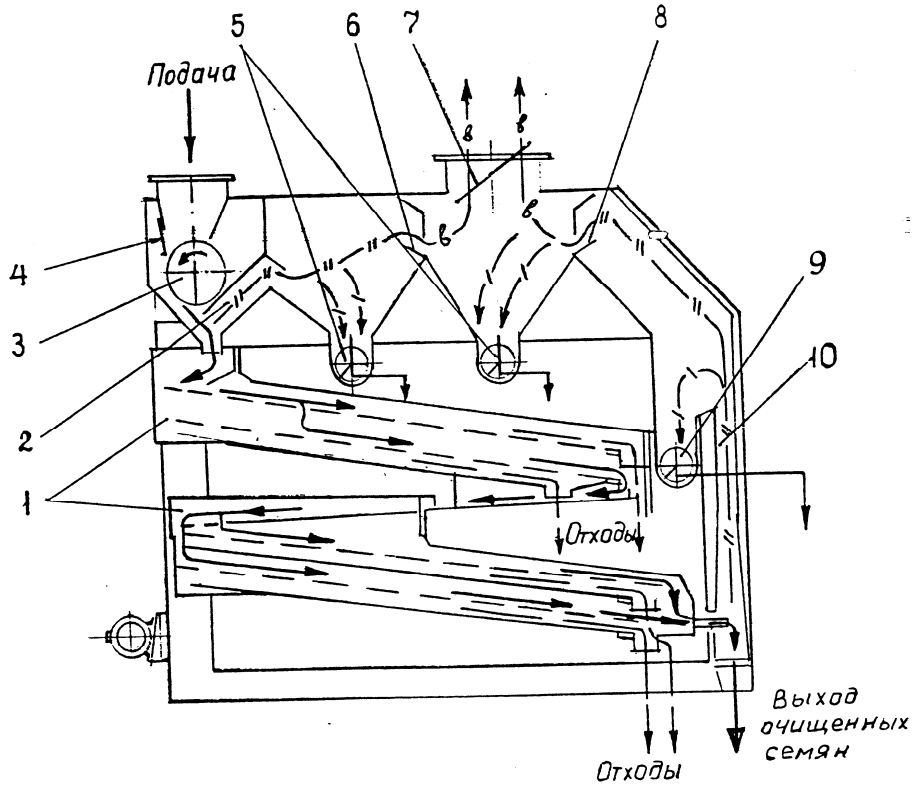


Рис.1. Функциональная схема воздушно-решетной зерноочистительной машины: 1 – решетные станы; 2 – пневмоканал предварительной аспирации; 3 – валик питающий; 4 – шибер; 5 - шнеки отвода легких воздушных примесей; 6 – заслонка тонкой регулировки пневмоканала предварительной аспирации; 7 – заслонка грубой регулировки подачи воздуха; 8 – заслонка тонкой регулировки пневмоканала окончательной аспирации; 9 – шнек вывода тяжелых воздушных примесей (легкое зерно); 10 – пневмоканал окончательной аспирации;

——— поток обрабатываемой культуры;
—//— воздушный поток с легкими примесями;
—/— примеси, осаждаемые в камере;
—в— воздушный поток с пылью;
— — отходы решетной очистки

Здесь x - набор технологических операций из $G_м(x,u)$ множества, реализуемых в $K_{\delta м}$ функциональной схеме ВРМ (см. рис.1); $G_\delta\left[K_{\delta M}(x),T_{\delta M}(x)\right]$ - математическая модель, определяющая показатели технологического процесса в ВРМ, для принятой $K_{\delta M}(x)$-й ее схемы.

Выходные показатели функционирования ВРМ определяются вектором $\vec{B}_{BPM}$, независимые аргументы которого случайные в вероятностно-статистическом смысле величины (см. рис.2), где $E_ф$ - критерий эффективности реализации технологического процесса ВРМ; $\varepsilon_{вj}$ - полнота выделения из ЗМ в очищенную фракцию отделяемых j-х компонентов $в_j, в_{МП}, в_{СП}$ - содержание в очищенных семенах j-х компонентов, зерновых и сорных примесей; δ_C - потери семян на xi операциях; $Q_{ОС}, Q_{ПС}, Q_C, Q_{ОК}$ - массы выхода

очищенных семян, отходов из пневмоканалов и отходов сорных и разных категорий.

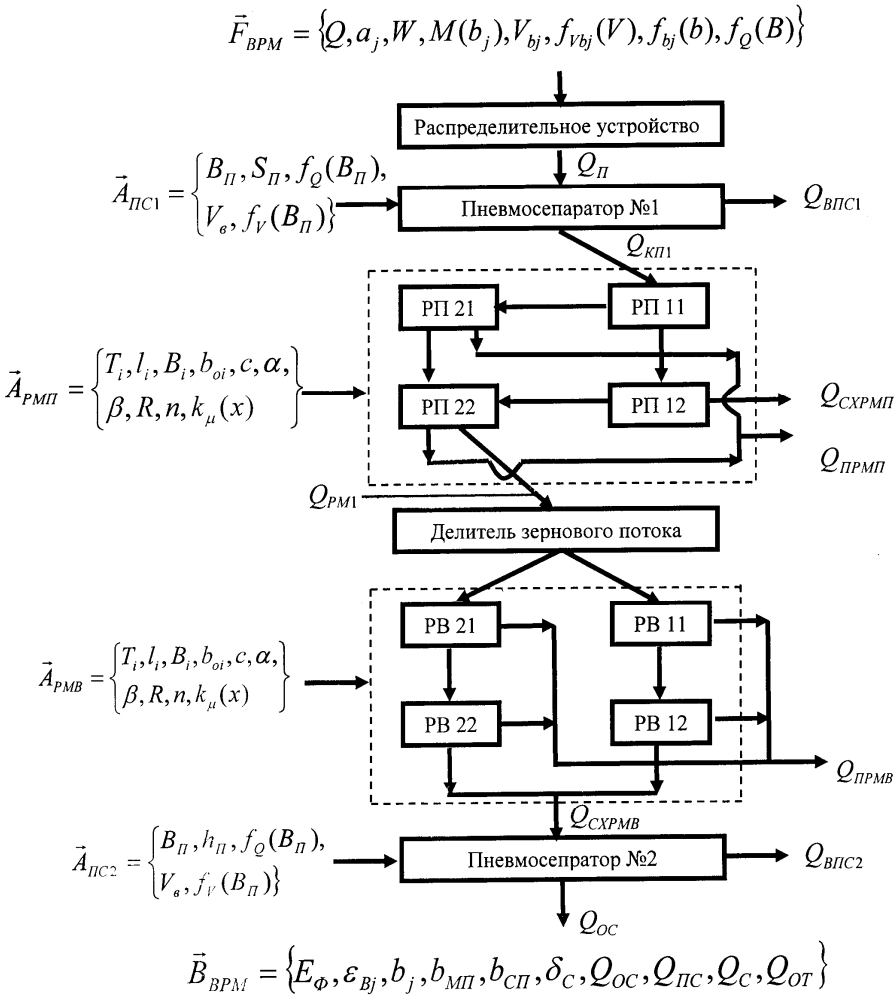


Рис.2. Структурная схема воздушно-решетной зерноочистительной машины

Обоснуем математическую модель $G_\delta\left[K_{\delta M}(X), T_\delta(X)\right]$ ВРМ. В соответствии с функциональной схемой рассматриваемая (см. рис.1, 2) ВРМ содержит два пневмосепаратора (№1 и №2) и два решетных модуля с известными функциональными связями между частными технологическими операциями. Для этих условий полнота выхода ε_{Bj} j-го компонента исходного ЗМ в очищенную в ВРМ фракцию семян:

$$\varepsilon_{Bj} = \prod_{i=1}^{5} \varepsilon_{bji}\,, \qquad (4)$$

где ε_{bji} - полнота выхода j-го компонента с i -го (i =1,2,3,4) рабочего органа на $(i+1)$ рабочий орган ВРМ и с 5-го $(i=5)$ рабочего органа в очищенные ВРМ семена ($i=1$ - операция распределения ЗМ семян по ши-

рине пневмосепаратора №1; $i=2$ - операция пневмосепарации в пневмосепараторе №1; $i=3$ - операции в первом решетном модуле; $i=4$ - операции во втором решетном модуле; $i=5$ - операция в пневмосепараторе №2).

Полнота выхода ε_{bOTj} в отходы j-го компонента ЗМ в ВРМ:

$$\varepsilon_{bOTj}=\sum_{M=1}^{2}Q_{bOTji}\cdot b_{bOTji}/Q\cdot a_j\,, \tag{5}$$

где Q_{bOTji} - количество j-го компонента ЗМ, выделенного i -м рабочим органом ВРМ в отходы; b_{bOTji} - содержание j-го компонента в отходах i -го рабочего органа ВРМ.

Для операции распределение ЗМ по ширине пневмосепаратора очевидно, что $\varepsilon_{bj(2)}=1$. Воздействие этой операции на последующую определится плотностью вероятности $f_Q(B_\Pi)$ распределения подачи Q ЗМ по ширине B_Π пневмосепаратора №1.

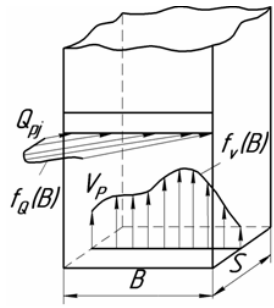


Рис.3. Схема пневмоканала сепаратора

Рассмотрим процесс пневмосепарации ЗМ в пневмосепараторе №1 (ПС1) шириной B и глубиной S (рис.3) с подачей Q в него гетерогенной сыпучей среды с известной или задаваемой плотностью вероятностей $f_Q(B)$ распределения этой подачи по ширине бокового ввода в ПС1 и плотностью вероятности $f_V(B)$ распределения средних по сечению пневмоканала скоростей воздушного потока.

Для этих условий полнота прохода j-го компонента ЗМ в очищенную на этой частной операции фракцию [1]:

$$\varepsilon_{Cj}=\frac{\sum_{p=1}^{e}Q_P\varepsilon_{Pj}(Q_{Pj}V_P)}{B\cdot Q/K}m_{jB}\cdot m_{jw}\,, \tag{6}$$

где $K=B/e$; Q_p - количество ЗМ, попадающего на каждый р-й участок (р=1,2,…,е) к-й ширины В рабочего органа:

$$Q_p=\frac{B\cdot Q_0}{K}\cdot\frac{\int_{p-1}^{p}f_Q(B)dB}{\int_{p=1}^{e}f_Q(B)dB}, \tag{7}$$

а средняя скорость воздушного потока на р-м участке:

$$V_p=\frac{B\cdot V}{K}\cdot\frac{\int_{p-1}^{p}f_v(B)dB}{\int_{p=1}^{e}f_v(B)dB}; \tag{8}$$

$\varepsilon_{Pj}(Q_P V_p)$ - полнота выхода в очищенную фракцию после пневмосепаратора №1 j-го компонента ЗМ с р-го участка ширины пневмосепаратора (р=1,2,…, e), определится из известных выражений [1] при $Q = Q_P$ и $V = V_P$.

Содержание сорных $(j = 1,2,...,c)$ примесей $b_{CП}$ в очищенных пневмосепаратором №1 семенах, содержащих $j = 1,2,...,в$ компонентов:

$$b_{CП} = \sum_{j=C} a_j \varepsilon_{Cj} / \left(\sum_{j=1}^{b} a_j \varepsilon_{Cj} \right), \quad (9)$$

полнота выделения пневмосепаратором №1 в отходы сорных (j = 1,2,…,c) примесей:

$$\varepsilon_{bcП} = \sum_{J=C} \left[a_j (1 - \varepsilon_{cj}) \right] / \sum_{j=1}^{c} a_j \ , \quad (10)$$

содержание j– х компонентов в очищенной пневмосепаратором №1 фракции:

$$b_{jП} = a_j \varepsilon_{Cj} / \left(\sum_{j=1}^{b} a_j \varepsilon_{Cj} \right), \quad (11)$$

Полнота выделения j–го компонента из ЗМ в пневмосепараторе №1

$$\varepsilon_{bjП} = (1 - \varepsilon_{Cj}), \quad (12)$$

содержание j–го компонента b_{jO} ЗМ в легких отходах:

$$b_{joП} = a_j (1 - \varepsilon_{Cj}) / (\sum_{j=1}^{b} \left[a_j (1 - \varepsilon_{Cj}) \right]), ; \quad (13)$$

масса Q_O выделенных отходов кг/(м·с):

$$Q_{OП} = \sum_{j=1}^{b} Q a_j (1 - \varepsilon_{Cj}), \quad (14)$$

масса очищенных в пневмосепараторе №1 зерна

$$Q_{KП1} = Q - Q_{OП}, \text{ кг/(м·с).} \quad (15)$$

Входное воздействие на рассматриваемый решетный модуль №1 (рис.2) выражается вектором $\vec{F}_p$, независимые аргументы которого случайные, в вероятностно-статистическом смысле величины:

$$\vec{F}_p = \left[Q_{pм}, a_{pj}, W, M\left(b_j\right), \sigma^2\left(b_j\right), f_Q\left(B_i\right), f_Q\left(H\right), f\left(l_i\right) \right]. \quad (16)$$

Активные средства, определяющие эффективность функционирования решетного модуля, определялись вектором $\vec{A}_{pMП}$ (см. рис.2), где $Q_{pм}, a_{pj}, W$ - подача ЗМ $Q_{РМ}=Q_{КП1}$ из выражения (15), содержание в нем j-х компонентов, его влажность W; $M\left(b_j\right), \sigma^2\left(b_j\right)$ - статистические характеристики размера признака разделения j-го компонента; $f_Q\left(B_i\right)$ - плотность вероятности распределения j-го компонента по ширине B_i i-го решета яруса в решетном модуле; $f\left(l_i\right)$ - закономерность поступления ЗМ на решета.

Рассмотрим решетные модули в ВРМ (см. рис.2) включающие классический двухъярусный модуль (решета РП11, РП12, РП21, РП22) и два параллельно функционирующих двухрешетных яруса (решета РВ11, РВ12; РВ21, РВ22).

Для классического двухъярусного решетного модуля полнота выхода j-го компонента ЗМ ε_{bjip}, в очищенную фракцию на p-м участке ширины решет в решетном модуле, определится из известного выражения [1]:

$$\varepsilon_{bjip} = \left(1-\varepsilon_{22\,jp}\right)\left[\varepsilon_{11\,jp}\left(1-\varepsilon_{21\,jp}\right)+\varepsilon_{12\,jp}\left(1-\varepsilon_{11\,jp}\right)\right], \qquad (17)$$

где $\varepsilon_{11\,jp},\varepsilon_{12\,jp},\varepsilon_{21\,jp},\varepsilon_{22\,jp}$ - полнота просевания j-го компонента через p-й участок ширины B_p решет (рис.4) с соответствующим номером решет (см. рис.2).

При известной или задаваемой плотности $f_Q(B)$ (рис.4) распределения вероятности подачи $Q_{KП1}$ ЗМ (поступающего после пневмосепаратора №1 на первый решетный модуль) по ширине B решет в модуле, приняв известную гипотезу [1], аддитивную по всей ширине решетного модуля полнота выхода j-го компонента ЗМ в очищенную фракцию i-го решетного модуля ($i=1$) можно определить по известным [2] выражениям:

$$\varepsilon_{\text{ej}i} = \frac{\sum_{p=1}^{e} Q_{pi}\, a_{ji}\, \varepsilon_{\text{ej}ip}\left(Q_{pi}\right)}{Q_i\, a_{ji}\, e}, \qquad (18)$$

где Q_{pi} - подача ЗМ на p-й участок ширины i-е решетного модуля ($i=1$); a_{ji} - содержание j-го компонента в ЗМ, поступающего на i-й решетный модуль; Q_i - суммарная подача ЗМ на i-й (первый) решетный модуль.

Очевидно, что Q_i и a_{ji} соответствуют этим показателям в ворохе, очищенном в пневмосепараторе №1:

$$Q_i = Q_{KП1} = Q_{OП}; \qquad a_{ji} = b_{jП}, \qquad (19)$$

где $Q_{OП}$ - из выражения (13); $b_{jП}$ - из выражения (11); величину Q_{pi} определяем из выражения, аналогичного (7):

$$Q_{pi} = \frac{B_O \cdot Q_i}{K} \cdot \frac{\int_{p-1}^{p} f_Q(B)\,dB}{\int_{p=1}^{e} f_Q(B)\,dB}. \qquad (20)$$

Общий выход Q_{b1}, очищенной на первом решетном модуле фракции семян и содержание в ней j-х компонентов b_{bj1}, определяем из выражений:

$$Q_{b1} = \sum_{j=1}^{b} Q_i\, a_{ji}\, \varepsilon_{bji}; \qquad (21)$$

$$b_{bj1} = Q_i\, a_{ji}\, \varepsilon_{bji} / Q_{b1}. \qquad (22)$$

Общее выделение примесей $Q_{П1}$ из ЗМ на 1-м решетном модуле и содержание в них j-го компонента $b_{Пj1}$ определяем из выражений:

$$Q_{П1} = \sum_{j=1}^{b} Q_i a_{ji} \left(1 - \varepsilon_{bji}\right); \tag{23}$$

$$b_{Пj1} = Q_i a_{ji} \left(1 - \varepsilon_{bji}\right) \Big/ Q_{П1} . \tag{24}$$

Рассмотрим в общем случае второй 2-ярусный решетный модуль (рис.2, рис.5) с неоднородными по длине ($l_{11},...l_{1n}$) и высоте (δ=1,2,…) решетами: 1-й ярус – решета Р11 и Р12, 2-й ярус – Р21 и Р22 (рис.5). В общем виде на два яруса решет поступает q_{1j}, q_{2j} количество j-го компонента ЗМ с их торцев, определяемое плотностью вероятности распределения $f_Q(H)$ случайной величины $Q = Q_{b1}$.

Распределения случайной величины q_δ по ширине B_p сепараторов в ярусах определится плотностью вероятности $f_Q(B)$.

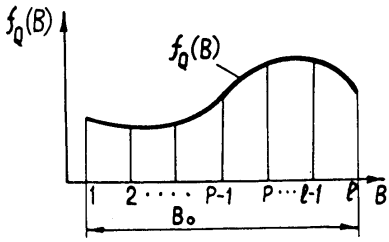


Рис.4. Плотность распределения вероятности $f_Q(B)$ непрерывной случайной величины Q по ширине B_o решетных сепараторов

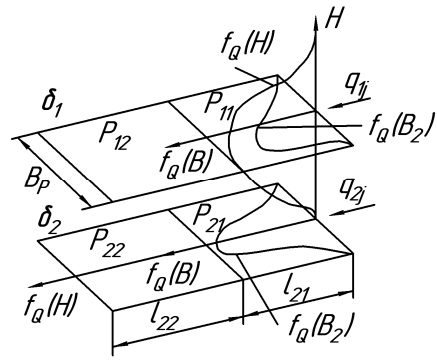


Рис.5. Схема решетного модуля

Приняв известную гипотезу об аддитивности процесса сепарации сыпучего материала на p-х участках решетных ярусов, полноту просеивания j-го компонента ЗМ на δ-м решетном ярусе определяем известным выражением [2].

При известных $f_Q(H)$ и $f_Q(B)$

$$\varepsilon_{\delta j} = \frac{\sum_{p=1}^{e} Q \cdot \dfrac{\int_{r-1}^{r} f_Q(H)dH}{\int_{r=1}^{c} f_Q(H)dH} \cdot \dfrac{\int_{p-1}^{p} f_Q(B)dB}{\int_{p=1}^{e} f_Q(B)dB} \cdot a_{j\delta} \cdot \varepsilon_{\delta jp}(q_{\delta p})}{\sum_j q_\delta \cdot a_j}, \tag{25}$$

где $\varepsilon_{\delta jp} = \varepsilon_{\delta 1 j} + (1 - \varepsilon_{\delta 1 j})\varepsilon_{\delta 2 j}$; r - количество участков по высоте H плотности вероятности распределения подачи Q ЗМ на два яруса решет ($r = 1,2,...,c$). При этом подача q_δ ЗМ на δ-й решетный ярус

$$q_\delta = Q \cdot P_\delta(Q), \tag{26}$$

где $P_\delta(Q)$ - вероятность подачи ЗМ Q на δ-й решетный ярус; $\varepsilon_{\delta j}, q_{\delta p}$ - полнота просеивания j-го компонента на p-м участке δ-го решет-

ного яруса при подаче $q_{\delta p}$ сыпучего материала на этот участок, которую можно определить из различных выражений [2] в зависимости от многих факторов:

$$\varepsilon_{\delta j}\left(q_{\delta p}\right)=f\left(Q,a_j,W,\gamma,f_j,L_{\delta m},d_m,\alpha_m,\beta_m,R_m,N_m,n\right), \quad (27)$$

где f_j,γ - вид сыпучего материала (зерно, семена трав и др.) и его плотность; $L_{\delta m}$ - длина m-го решета δ-го решетного яруса; $d_{\delta m}$ - рабочий размер отверстий m-го решета δ-го яруса; $\alpha_{\delta m},\beta_{\delta m},R_{\delta m},N_{\delta m}$ - угол наклона к горизонту, направленность, амплитуда и частота колебаний m-го решета в δ-м ярусе; n - количество решет в ярусе.

При известной полноте просеивания $\varepsilon_{\delta j}$ j-го компонента на отдельном ярусе решет ($\delta=1,2$), полнота просеивания j-го компонента на двух ярусах решетного модуля определится из выражения, аналогичного (18)

$$\varepsilon_j=\frac{\sum_{\delta=1}^{2}q_{\delta}\cdot a_{\delta j}\cdot\varepsilon_{\delta j}}{Q\cdot a_j\cdot 2}, \quad (28)$$

где $a_{\delta j}$ - содержание j-го компонента в ЗМ, поступающем на δ-й решетный ярус.

Полнота схода $\varepsilon_{CX\delta mj}$ j-го компонента с δm-го решета в очищенную δ-м решетным ярусом фракцию (с первого яруса – с решета: $\delta=1$, $m=2$, решета Р12; со 2-го яруса: $\delta=2$, $m=2$, решета РВ22):

$$\varepsilon_{CX\delta mj}=\frac{\sum_{p=1}^{e}q_{\delta mp}a_j\varepsilon_{CX\delta mj}\left(q_{\delta mp}\right)}{q_{\delta m}a_j e}, \quad (29)$$

а со всех m-х решет двухъярусного решетного модуля

$$\varepsilon_{CXmj}=\sum_{\delta=1}^{2}P_{\delta}\left(Q\right)\varepsilon_{CX\delta mj}. \quad (30)$$

Общий выход Q_{b2}, очищенной на втором решетном модуле из двух ярусов решет фракции семян и содержание в ней j-го компонента b_{bj2}, определится из выражений, аналогичных (21) и (22):

$$Q_{b2}=\sum_{j=1}^{b}Q_{b1}b_{bj1}\varepsilon_{CXmj}; \quad (31)$$

$$b_{bj2}=Q_{b1}b_{bj1}\varepsilon_{CXmj}/Q_{b2}. \quad (32)$$

Общее выделение примесей $Q_{П2}$ из ЗМ, поступившего на второй двухъярусный решетный модуль и содержание в них j-го компонента $b_{Пj2}$, определяется из выражений

$$Q_{П2}=\sum_{j=1}^{b}Q_{b1}b_{bj1}\left(1-\varepsilon_{CXmj}\right), \quad (33)$$

$$b_{\Pi j2} = Q_{b1} b_{bj1} \left(1 - \varepsilon_{CXmj}\right) \Big/ Q_{\Pi 2} \,. \qquad (34)$$

Математическая модель процесса пневмосепарации фракции семян ЗМ, очищенного во втором решетном модуле, в пневмосепараторе №2 (см.рис.1, рис.2), идентична по форме математической модели сепарации ЗМ в пневмосепараторе №1 (см. (6)-(15)). При этом в эти выражения вводим

$$Q = Q_{b2}\,; \qquad a_j = b_{bj2}\,, \qquad (35)$$

выражения плотности вероятности распределения подачи ЗМ $f_Q\left(B\right)$ и скорости воздушного потока $f_v\left(B\right)$ по ширине B соответственно для пневмосепаратора №2.

Тогда с учетом этих изменений полноту выхода ε_{cj} j-х компонентов в очищенную фракцию семян определяем из выражения (6), выход очищенных в ВРМ семян Q_{oc} и содержание в них j-х компонентов ЗМ – из выражений (15) и (11), выход выделенных отходов $Q_{от}$ и содержание в них j-х компонентов ЗМ – из выражений (14) и (13).

Используя выражение (4), можно оценить величину полноты выхода ε_{Bj} j-го компонента исходного ЗМ в очищенную всей ВРМ фракцию. Здесь ε_{bj} определяем соответственно по формулам: для операции – распределение ЗМ по ширине сепараторов ε_{bj} =1; для операции пневмосепарации в пневмосепараторе №1 $\varepsilon_{bj} = \varepsilon_{cj}$ - по выражению (6), для первого решетного модуля $\varepsilon_{bj} = \varepsilon_{bji}$ - по выражению (18); для второго решетного модуля $\varepsilon_{bj} = \varepsilon_{CXmj}$ - по выражению (30); для пневмосепаратора №2 $\varepsilon_{bj} = \varepsilon_{cj}$ - по выражению (6).

Выводы. Построена функциональная математическая модель воздушно-решётной зерноочистительной машины с последовательным расположением решётных модулей. При заданных аргументах входных $\vec{F}_i$ и управляющих $\vec{A}_i$ воздействий, используя методы нелинейного программирования, можно проводить многомерный анализ и параметрическую оптимизацию семяочистительных машин с рассмотренной структурой элементов.

Библиографический список

1. *Ермольев Ю.И.* Тенденции и перспективы развития технологий и технических средств для семенной очистки зерна / Ю.И. Ермольев, М.В.Шелков, М.Н.Московский // Изв. вузов Сев.-Кав. регион. Сер. Техн. науки.– Ростов н/Д, 2005. – С.112-119.

2. *Ермольев Ю.И.* Интенсификация технологических операций в воздушно-решетных зерноочистительных машинах / Ю.И.Ермольев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1998.

Материал поступил в редакцию 21.07.08.

U.I. ERMOLYEV, A.I. MARTINENKO, A.V. BUTOVCHENKO

THE MODELING OF THE GRAIN SEPARATING PROCESS IN AN AERIAL – LATTCED GRAIN CLEANING MACHINE

The adequate mathematical model of the process of the functioning of aerial – latticed grain cleaning machine with mutitier lattice – like moduli has been constructeol.

ЕРМОЛЬЕВ Юрий Иванович (р.1943), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины и оборудование» ДГТУ. Окончил РИСХМ в 1969 году.
Научные интересы: решение проблемы системной сепарации сыпучих гетерогенных сред сельскохозяйственного назначения, направленной на создание новых современных технологий и технических средств для поточной сепарации зерновых и других сельхозматериалов.
Автор более 200 научных публикаций, в том числе трех монографий.

МАРТЫНЕНКО Александр Иванович (р.1963), инженер. Окончил РИСХМ в 1985 г. Специалист в области сельскохозяйственных машин.
Имеет две научные публикации.

БУТОВЧЕНКО Андрей Владимирович (р.1982),ассистент кафедры «Сельскохозяйственные машины и оборудование» ДГТУ. Окончил ДГТУ в 2004 г. Специалист в области сельскохозяйственных машин.
Имеет 13 научных публикаций.

УДК 539.3/4:534(0.31)

В.П. ЖАРОВ, В.И. ИГНАТЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ПРУЖИННОГО ЗУБА КУЛЬТИВАТОРА НА МИКРОУРОВНЕ В ПОЛЯРНЫХ КООРДИНАТАХ

Приводится вывод математической модели НДС криволинейного бруса переменного сечения и кривизны в полярных координатах, допускающего решение через степенные и логарифмические функции.
Ключевые слова: *математическая модель, криволинейный брус, напряженно-деформированное состояние.*

Введение. В современном культиваторостроении широко применяются пружинные зубья и стойки для крепления рабочих органов. Считается, что благодаря возникающим вибрациям они лучше рыхлят, меньше забиваются и могут обходить препятствия. В качестве типового на рис.1,а приведён пружинный зуб КПЦ с S-образной стойкой сечением 10х30 мм, разноориентированным по длине стойки.

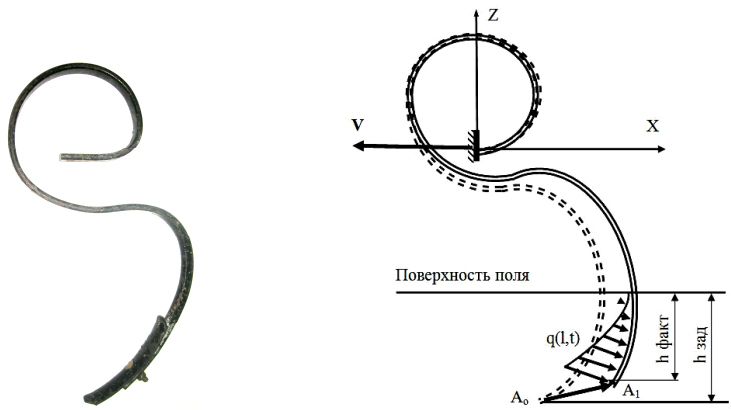


Рис.1. Пружинный зуб культиватора: а – общий вид; б – расчётная схема

Соотношение большего размера сечения к длине более 1/30. С точки зрения строительной механики такую пружинную стойку следует отнести к плоским кривым брусьям переменного сечения и кривизны. Расчётная схема пружинного зуба приведена на рис.1. Распределённая по подземной части нагрузка q(*l*, t) приложена в плоскости стойки, имеет постоянную составляющую q_o, на которую накладывается переменная $q_v(t)$. Под действием нагрузки стойка получает упругие деформации s(l,t), её конфигурация изменяется (пунктиром показано начальное положение, сплошным – под нагрузкой).

Направление смещений и технологические преимущества стойки определяет конфигурация стойки. Задавать конфигурацию как соотношение между координатами z = z (x) нерационально, так как функция полу-

чается неоднозначной. Более рационально задавать конфигурацию в параметрической форме двумя зависимостями:

$$x = x(l); \qquad z = z(l), \tag{1}$$

где l – длина текущего участка стойки, являющаяся здесь параметром.

Длину l участков стойки рациональней определять не по его воображаемой осевой линии, недоступной для измерений, а по передней грани. Именно она взаимодействует с почвенной средой, именно её форму регламентируют, а её кривизну указывают на чертежах.

Используя зависимость (1), можно определить переменный радиус кривизны по длине стойки R(l) по формулам аналитической геометрии:

$$R(l)=\frac{(1-dz/dx)^{\frac{3}{2}}}{d^2z/dx^2}, \tag{2}$$

где производные функции z (x) задаются через производные по параметру l:

$$dz/dx = z'(l)/x'(l); \qquad d^2z/dx^2 = \frac{x'(l)z''(l)-z'(l)x''(l)}{[x'(l)]^3}. \tag{3}$$

Формулировка проблемы. Пружинные зубья просты по конструкции и эффективны в работе. Но они имеют и недостатки, проистекающие из их достоинств: работая вблизи порога прочности, они имеют постоянные проблемы с прочностью и долговечностью. Напряжённо-деформированное состояние (НДС) пружинных стоек обычно рассчитывают по формулам сопромата [1, 3], рассматривая равновесие отсечённой части с применением гипотезы плоских сечений. При такой структуризации получается лишь приближённая модель на макроуровне, не способная описывать поля напряжений в упругой стойке как сплошной среде.

Постановка задачи. Пружинный зуб, взаимодействующий с почвенной средой, является объектом с распределенными параметрами по длине стойки, находящейся под действием распределенной нагрузки. Стоит задача создания математического описания НДС пружинного зуба на микроуровне как краевую задачу с использованием уравнений теории упругости в частных производных.

Разработка модели НДС пружинного зуба. Объект моделирования представляет упругое тело в виде криволинейного бруса и к нему справедливы базовые соотношения теории упругости. В ней используются уравнения НДС упругого тела в декартовой системе координат, в которой малый элемент представляется соответственно в виде прямоугольного параллелепипеда [1], [2]. Однако их применение к криволинейной стойке имеет проблемы, связанные с невозможностью представления криволинейных тел элементами типа прямоугольного параллелепипеда.

Лучшие результаты для криволинейного тела даёт применение дугообразного элемента abcd, центр кривизны которого совмещён с центром кривизны O рассматриваемого текущего сечения стойки (рис.2) с радиусом кривизны R и углом наклона θ. Элемент ограничен двумя сечениями, проходящими через центр кривизны и составляющими угол dθ. Радиус ближней грани элемента r, высота элемента dr, длина dℓ элемента dℓ = r dθ.

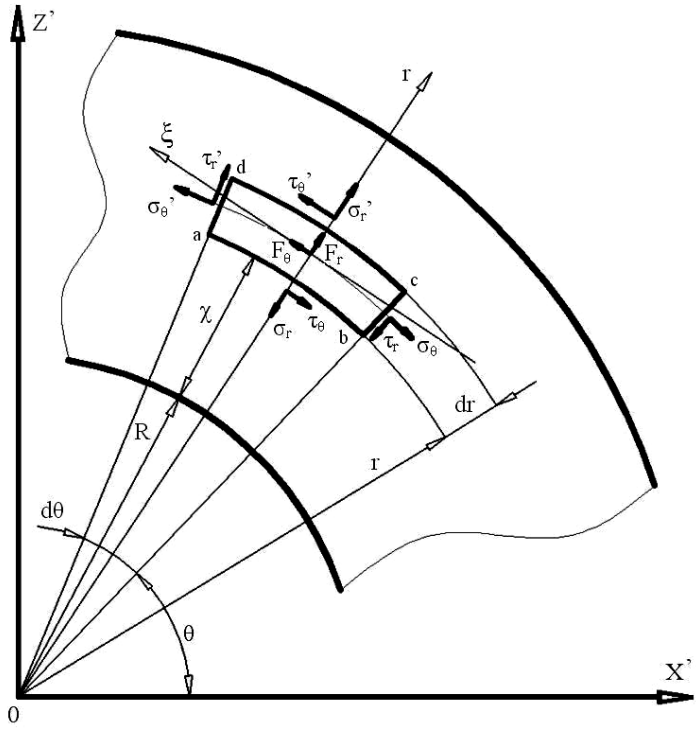


Рис.2. Расчётная схема НДС пружинного зуба

Рассмотрим равновесие элемента. На гранях элемента действуют нормальные напряжения σ_θ σ_θ' σ_r σ_r' и тангенциальные τ_θ τ_θ' τ_r τ_r' . Напряжения на противоположных гранях связаны через приращения $\Delta\sigma_r$, $\Delta\sigma_\theta$, $\Delta\tau_r$ и $\Delta\tau_\theta$:

$$\sigma_r' = \sigma_r + \Delta\sigma_r\,;\ \sigma_\theta' = \sigma_\theta + \Delta\sigma_\theta\,;\ \tau_r' = \tau_r + \Delta\tau_r\,;\ \tau_\theta' = \tau_\theta + \Delta\tau_\theta\,. \qquad (4)$$

Приращения в линейной постановке выражаются через частные производные:

$$\Delta\sigma_r = \frac{\partial\sigma_r}{\partial r}dr\,;\ \Delta\tau_r = \frac{\partial\tau_r}{\partial\theta}d\theta\,,\ \Delta\sigma_\theta = \frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\theta}d\theta\,;\ \Delta\tau_\theta = \frac{\partial\tau_\theta}{\partial r}dr\,. \qquad (5)$$

Умножая напряжения на площадь граней, получаем силы на гранях:
нормальные $F_{\sigma r}=\sigma_r r d\theta\, b$; $F_{\sigma r}'=\sigma_r'(r+dr)d\theta b$; $F_{\sigma\theta}=\sigma_\theta\, dr\, b$; $F_{\sigma\theta}'=\sigma_\theta' dr b$;
касательные $F_{\tau\theta}=\tau_\theta r d\theta b$; $F_{\tau\theta}'=\tau_\theta'(r+dr)d\theta\, b$; $F_{\tau r}=\tau_\theta dr\, b$; $F_{\tau r}'=\tau_\theta'\, dr\, b$. (6)

В центре элемента действует объёмная сила от сил веса или инерции:

$$F_o = m\, d^2s/dt^2, \qquad (7)$$

где масса элемента $m = \rho\, b\, dr\, d\theta\, (r + dr/2)$; ρ – плотность материала.

Составляющие силы по оси r и ξ :

$$F_{or} = F_o\cos(\theta+d\theta/2); \quad F_{o\xi} = F_o\sin(\theta+d\theta/2). \qquad (8)$$

Условие равновесия элемента: проекции всех сил на выбранные оси координат r и ξ должны быть равны нулю.

Проекции на радиальную ось r:

$$\Sigma F_{ir} = 0 \text{ или } F_r' - F_r - (F_\theta + F_\theta')\sin\theta/2 + F_{\tau r}' - F_{\tau r} + F_{or} = 0. \qquad (9)$$

Развернув это выражение с помощью выражений (4)-(8) после вычитания, замены sin θ/2 ≈ θ/2 , деления на r dθ dr b и пренебрежения величинами второго порядка малости, получим:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial \tau}{\partial \theta} + \frac{1}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta) + \rho g \cos\left(\theta + \frac{d\theta}{2}\right) = 0. \qquad (10)$$

Уравнение (10) совпадает с полученными в литературе [1] для кривых брусьев постоянной кривизны.

Проекции на касательную ось ξ :

$$\Sigma F_{i\theta} = 0 \text{ или } F_\theta' - F_\theta + F_{\tau\theta}' - F_{\tau\theta} + F_{o\theta} + F_{\tau r}' \sin\theta/2 + F_{o\xi} = 0. \qquad (11)$$

Развернув это выражение с помощью выражений (4)-(8) после вычитания, замены sinθ/2≈θ/2 , деления на r dθ dr b и пренебрежения величинами второго порядка малости, получим:

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + F_{\tau r}\sin\left(\theta + \frac{d\theta}{2}\right) = 0. \qquad (12)$$

Развернув уравнение суммы моментов относительно центра элемента, получим:

$$\Sigma M_o = 0 \text{ или } [\tfrac{1}{2}F_{\tau r}(r+\Delta r)d\theta + \tfrac{1}{2}F_{\tau r}'(r+\Delta r)d\theta]\cos\varphi/2 + \\ + \tfrac{1}{2}[F_{\tau\theta}(\Delta r + \tfrac{1}{2}F_{\tau\theta}'\Delta r] = 0, \qquad (13)$$

откуда следует, что равенство будет выполняться при $\tau_\theta = \tau_r = \tau$.

Неудобство уравнений равновесия (10) и (12) заключается в использовании переменных r и θ, труднодоступных для измерений. Выразим их через более удобные координаты: расстоянию χ элемента от поверхности передней грани стойки и от места крепления l:

$$r = R + \chi\,; \qquad \partial r = \partial(R + \chi) = \partial\chi\,; \qquad R d\theta = d\,l. \qquad (14)$$

Умножив и разделив уравнения на R и приняв во внимание соотношения (14), получим уравнения упругости через более удобные координаты χ и l:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial \chi} + \frac{R}{R+\chi}\frac{\partial \tau}{\partial l} + \frac{1}{R+\chi}(\sigma_r + \sigma_\theta) + f_r = 0; \qquad (15)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \chi} + \frac{R}{R+\chi}\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial l} + \frac{2\tau}{R+\chi} + f_\xi = 0, \qquad (16)$$

где f_r и f_ξ – компоненты удельной объёмной нагрузки на единицу массы:

$$f_r = \rho g \sin\left(\theta + \frac{d\theta}{2}\right), \quad f_\xi = \rho g \sin\left(\theta + \frac{d\theta}{2}\right). \qquad (17)$$

Обращает на себя внимание тот факт, что для прямолинейного бруса, когда $R \to \infty$, эти уравнения превращаются в классические уравнения теории упругости в декартовых координатах [2]. Тем самым выведенные уравнения с учётом кривизны бруса оказываются более общей моделью теории упругости; существующие уравнения теории упругости являются их частным случаем.

Полная математическая модель НДС кривого бруса на микроуровне помимо уравнений равновесия (15), (16) должна включать геометрические уравнения, физические уравнения, уравнение совместности и условия на поверхности.

Г*еометрические уравнения* в полярных координатах, выражающие относительные удлинения ε_r, ε_θ и сдвиг $\gamma_{\theta r}$ через компоненты перемещений s_r и s_ξ, получаются из уравнений Коши в декартовых координатах в виде:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial s_r}{\partial \chi};\ \varepsilon_\theta = \frac{\partial s_\xi}{\partial l} + \frac{s_r}{R+\chi};\ \gamma_{\theta r} = \frac{\partial s_r}{\partial l} + \frac{\partial s_\xi}{\partial \chi} - \frac{s_\xi}{R+\chi}. \quad (18)$$

Физические уравнения (закон Гука) аналогичны таковым в декартовых координатах.

Уравнение совместности деформации в полярных координатах формулируется через гармонический оператор над напряжениями $\sigma_\theta + \sigma_r$ в точке, поскольку в теории упругости сумма напряжений в точке одинакова при любом наклоне площадки, т.е. $\sigma_x+\sigma_y= \sigma_\theta+\sigma_r$:

$$\nabla^2 (\sigma_\theta + \sigma_r) = 0. \quad (19)$$

Декартовый гармонический оператор $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ выразится в полярных координатах через формулы дифференцирования сложного аргумента [1, с. 113]:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial \ell^2}. \quad (20)$$

Бигармоническое уравнение совместности

$$\nabla^2\ \nabla^2 \varphi = 0, \text{ или } \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial \ell^2}\right) \times \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial \ell^2}\right) = 0. \quad (21)$$

Способ решения. Поскольку напряжения в точке не зависят от выбираемой системы координат, то НДС можно получать, как в классической теории упругости, через функцию напряжений Эри φ(x, z), но выразив её в полярных координатах [1, с. 112-113].

Не учитывая для простоты выкладок объёмные силы от веса стойки, заменяя r и θ новыми переменными χ, l по соотношениям (14), получим напряжения через функцию напряжений в новых координатах φ(χ, l):

$$\sigma_r = \frac{1}{R+\chi}\frac{\partial \varphi}{\partial \chi} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial l^2};\ \sigma_\xi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \chi^2};\ \tau = \frac{1}{(R+\chi)}\frac{\partial \varphi}{\partial l} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \chi \partial l}. \quad (22)$$

Тем самым задача о НДС пружинного зуба сводится к поиску функции φ(χ, l), удовлетворяющей граничным условиям. Некоторую информацию о её структуре дают наработки сопромата [3]. С точностью до постоянного множителя φ характеризует изгибающий момент M. С точностью до произвольных постоянных A и B он выражается через конфигурацию стойки по соотношениям (1):

$$M = Ax(l) + Bz(l). \quad (23)$$

Распределение напряжений по толщине сечения имеет закон [3, с.219-221]:

$$\sigma(\chi) = C(1 - D/(R+\chi)). \quad (24)$$

Тогда структура функции напряжений может приниматься в виде:

$$\varphi(\chi, l) = [Ax(l) + Bz(l)][C\chi^2 + D\chi \ln(R+\chi) + E\chi + G], \quad (25)$$

где A, B, C, D, E, G – произвольные постоянные, подлежащие определению.

Произвольные постоянные находятся подстановкой аппроксимации (25) функции напряжений φ(χ, l) в уравнения (15), (16), (18), (21) с учё-

том граничных условий и условий на поверхности пружинного зуба. После определения функции φ(χ, *l*) поля напряжений находятся по формулам (22).

Заключение. Таким образом, математическое моделирование НДС кривого пружинного зуба на микроуровне в полярных координатах приводит задачу к более общим уравнениям, чем классические уравнения теории упругости в декартовых координатах, и в то же время сохраняет возможности аналитического решения задачи через аппроксимацию функции напряжений степенными и логарифмическими функциями.

Библиографический список

1. Александров А.В., Потапов В.Д. Сопротивление материалов: Основы теории упругости и пластичности / А.В.Александров, В.Д.Потапов. – М.: Высшая школа, 2002. – 399с.

2. Жилкин В.А. Расчеты на прочность и жесткость элементов сельскохозяйственных машин: учеб. пособие; под ред. В.В.Бледных / В.А. Жилкин. – Челябинск: ЧНАУ, 2004. – 427 с.

3. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: в 8 т.: учеб. для втузов / В.И.Феодосьев. Т.2. – М.: Изд-во МГТУ, 1999. – 589 с.

Материал поступил в редакцию 26.02.08.

V.P. ZHAROV, V.I. IGNATENKO

THE MATHEMATICA L MODE L OF STRESS-DEFORMED STATE OF SPRING TOOTH CULTIVATION AT THE MICRO LEVE L IN POLAR COORDINATES

A withdrawa l of a mathematica l mode l of stress-strain state curved beam changing sections and curvature in polar coordinates, allowing the decision through power and logarithmic functions.

ЖАРОВ Виктор Павлович (р. 1937), заведующий кафедрой «Теоретическая механика», доктор технических наук (1980), профессор (1981), Заслуженный работник высшей школы (1996). Окончил РИСХМ (1963) по специальности «Конструирование и производство сельскохозяйственных машин».

Научные интересы связаны с исследованием гидравлических систем автоматического регулирования и управления мобильных машин и технологического оборудования.

Автор более 200 научных трудов, 9 авторских свидетельств и патентов РФ.

ИГНАТЕНКО Виталий Иванович (р.1984), ассистент кафедры «Теоретическая механика». Окончил ДГТУ (2006) по специальности «Управление и информатика технических систем».

Научные интересы связаны с исследованием динамики и прочности упругих систем сельскохозяйственных машин.

Имеет 6 научных статей.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.791.052-192

Ю.Г. ЛЮДМИРСКИЙ, А.А. ПАРХОМЕНКО

МЕТОД ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ ПЕРЕХОДА ОТ ШВА К ОСНОВНОМУ МЕТАЛЛУ

Рассмотрен подход к анализу напряженного состояния конструкции, основанный на разделении напряжений на напряжения, связанные с макрогеометрией, конфигурацией конструкции в целом, и с микрогеометрией зоны перехода от шва к основному металлу. Представлены результаты повышения усталостной прочности штуцерных соединений путем изменения их конструктивного оформления, основанного на данном подходе.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, долговечность, напряжения, макрогеометрия и микрогеометрия конструкции.*

Введение. В различных изделиях машиностроения (барабанах котлов, сосудах давления, газгольдерах и др.) встречаются соединения труб, патрубков, штуцеров с корпусом изделия. Такие конструкции, условно назовём их «штуцер-лист» (рис.1), часто нагружаются гидростатическим давлением, при этом в стенках соединения возникает двухосное растяжение и изгиб. В зависимости от размеров штуцера и кривизны стенки сосуда доля мембранных составляющих и напряжений изгиба может быть различна. В случае малой частоты нагружения и высокого уровня повторно-действующих нагрузок в таких конструкциях можно рассматривать процессы их разрушения с позиций малоцикловой усталости. При проектировании указанных изделий большое внимание уделяется оценке их прочности. Несмотря на это они часто становятся источником разрушения. Причин преждевременных разрушений соединений «штуцер-лист» много. В данной работе рассматривается, на наш взгляд, наиболее главная причина – это высокие рабочие напряжения в зоне перехода от шва к основному металлу.

Постановка задачи и ее решение. Поскольку физические и металлургические процессы, протекающие при сварке, не поддаются моделированию в полном объеме, было принято решение о проведении испытаний на натурных сварных узлах при полном сохранении технологии сварки и основных параметров геометрии соединения. Исследования малоцикловой усталости сварных соединений проводили на образцах в виде дисков диаметром 550 мм толщиной 30 мм на установке УДИ-25 [1, 2]. В этих установках образцы в виде дисков шарнирно закрепляются по контуру, нагружаются гидростатическим давлением масла. Под действием гидростатического давления диск прогибается, в нём возникает осесимметричный изгиб. На внутренней поверхности диска возникают напряжения сжатия, на внешней поверхности образца - напряжения растяжения и на неё воздействует коррозионная среда – 3%-ный водный раствор хлористого натрия. Испытания образцов проводились при повторно-статическом отнулевом нагружении с максимальными напряжениями в цикле 900 МПа с частотой 10 циклов/мин.

Следует отметить, что максимальные напряжения возникают в центральной части образцов. Большие размеры исследуемой зоны на поверхности образцов способствуют более полному протеканию коррозионных процессов и увеличивают статистическую вероятность возникновения и развития разрушения, что в целом приближает условия испытания к реальным условиям работы нагруженных корпусных конструкций.

Для всех сварных соединений в качестве основного металла была взята конструкционная хромоникельмолибденовая сталь. Ручная дуговая сварка выполнялась аустенитными электродами ЭА 981/15. Поскольку зарождение усталостного разрушения происходит со стороны растянутых волокон, напряженное состояние исследовали на растянутой поверхности образца. Напряжения измеряли тензорезисторами с базой 5 мм и с базой 1 мм в зоне локализации напряжений, а также определяли расчетным путем методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса ANSYS.

На рис.1 показана конструкция штуцерного соединения с симметричными угловыми швами, на рис.2 представлено распределение радиальных напряжений на растянутой поверхности этого соединения. Распределение напряжений в металле шва и штуцере не приведены, так как по мере роста толщины сечения конструкции, напряжения в сварном шве и в штуцере резко падают. По оси абсцисс за ноль выбрана точка перехода от шва к основному металлу. Столь резкое повышение напряжений в районе сварного соединения можно объяснить концентрацией напряжения в зоне перехода от шва к основному металлу. Для детального анализа факторов, влияющих на концентрацию напряжений, целесообразно выделить две составляющие:

- составляющую, обусловленную геометрией локальной зоны перехода от шва к основному металлу, – «локальная концентрация»;
- составляющую, обусловленную геометрией сварного соединения, – «глобальная концентрация».

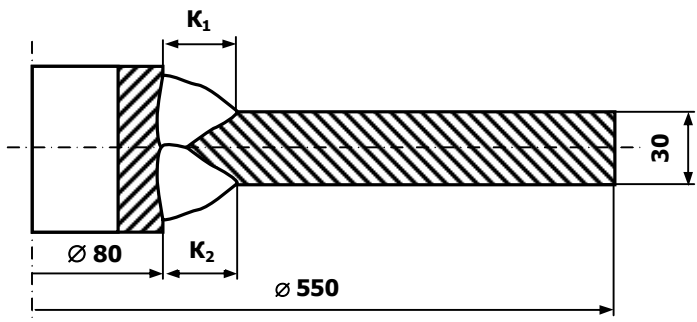


Рис.1. Конструкция соединения с симметричными угловыми швами

При всей условности такого подхода к анализу напряженного состояния он позволяет найти пути раздельного влияния на каждую составляющую и расширяет возможности в поисках методов снижения концентрации напряжений за счет изменения конструктивных параметров соединения и технологических приемов.

Такой подход упрощает методы расчетной оценки долговечности сварных конструкций, основанных на результатах экспериментов, поскольку позволяет выделить составляющую, обусловленную сваркой.

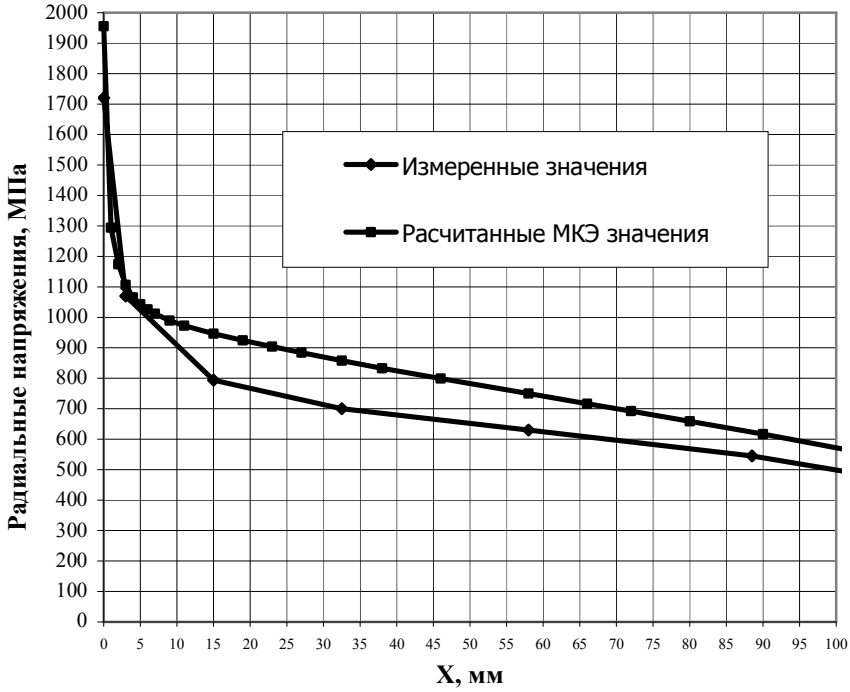


Рис.2. Распределение радиальных напряжений на растянутой поверхности соединения с симметричными угловыми швами (см.рис.1); рабочее давление 85 атм

Схематично предлагаемый подход можно представить следующим образом: из сварной конструкции «вырезают ячейку», в которой локальная геометрия и локальные свойства полностью зависят от технологии сварки. Эта «ячейка» ответственна за стадию зарождения усталостного разрушения. Остальная часть сварного соединения подобно внешней нагрузке влияет на уровень напряжений в «ячейке». Таким образом, получив характеристики усталостной прочности для любого сварного соединения, содержащего такую «ячейку», можно путем пересчета распространить их на другое сварное соединение, отличающееся глобальной геометрией сечения.

Рассмотрим практическую реализацию такого подхода. Уменьшить глобальную составляющую концентрации напряжений на растянутой поверхности образца можно путём увеличения величины катета со стороны сжатых волокон. Локальную составляющую напряжений можно регулировать путём изменения радиуса перехода от шва к основному металлу.

Оценим возможности регулирования глобальной составляющей напряжений за счет увеличения катета шва со стороны сжатых волокон соединения. Конструкция соединения представлена на рис.3, распределение напряжений на растянутой поверхности этого соединения – на рис.4. Характер эпюр можно регулировать соответствующим изменением размера

катета подкрепляющего шва, для получения напряжений требуемого уровня, а следовательно, требуемой долговечности сварного соединения и конструкции в целом.

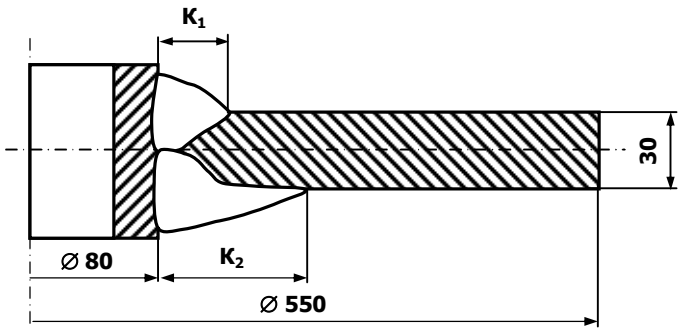


Рис.3. Конструкция соединения с подкрепляющим швом $K_2 = 2\ K_1$

Локальную составляющую напряжений можно изменить за счет технологических приемов. Это может быть изменение радиуса перехода от шва к основному металлу путем механической обработки или путем повторного расплавления металла в этой зоне дугой в аргоне с поперечными колебаниями неплавящегося электрода. Второй путь более технологичный.

В экспериментах использовали следующие режимы сварки: диаметр вольфрамового электрода 3 мм; сварочный ток 120 А; напряжение на дуге 8-10 В; скорость сварки 8 м/ч; частота поперечных колебаний электрода 90 мин$^{-1}$; амплитуда колебаний – 10мм. Такой режим обработки позволяет получать радиус зоны перехода 8-10 мм.

Следует отметить, что изменение локальной геометрии зоны перехода и глобальной геометрии сварного соединения приводит к существенному снижению уровня напряжений в предполагаемой зоне усталостного разрушения (рис.4).

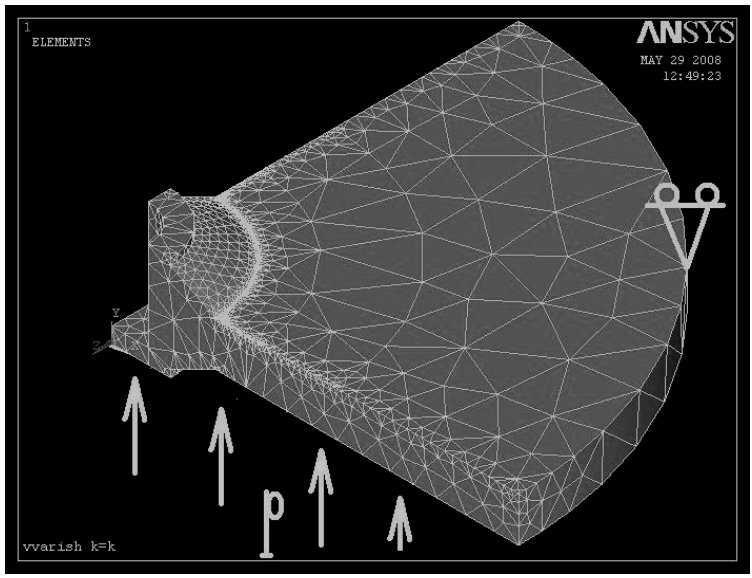


Рис. 4. Схема нагружения образцов и сетка конечных элементов

Результаты расчета, полученные методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS, подтверждают экспериментально полученные эпюры напряжений. Схема нагружения образцов и сетка конечных элементов представлена на рис.4, результаты расчета на рис.5.

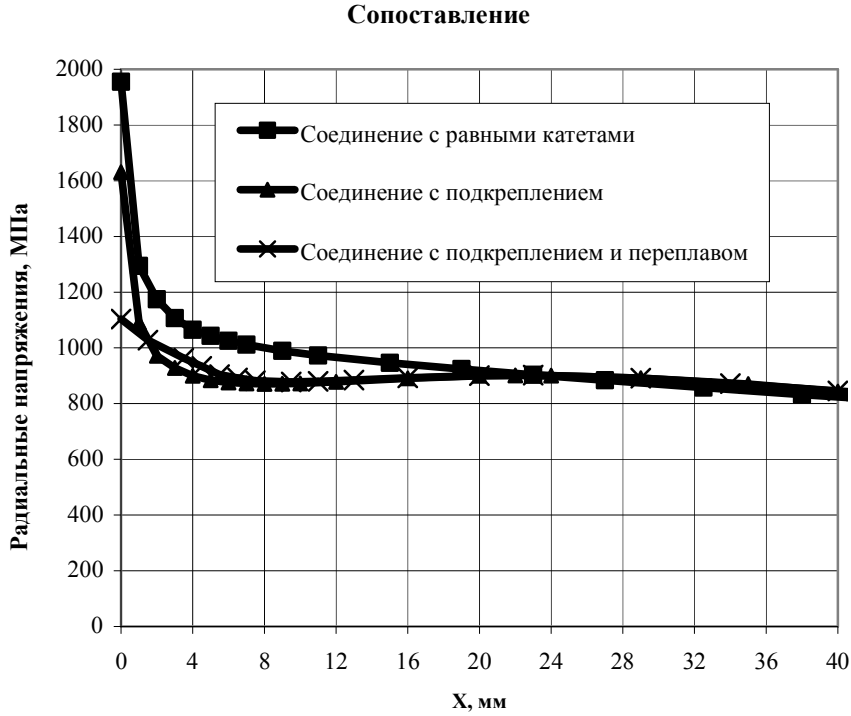


Рис.5. Сводный график расчета МКЭ соединений «штуцер-лист»

Проведенные исследования образцов на малоцикловую усталость (см. таблицу) показывают, что долговечность сварных соединений по зарождению разрушения с подкрепляющим швом в 1,5-3 раза выше, чем у соединений с равными катетами, а по моменту потери герметичности до 1,5 раз выше.

Результаты исследования образцов на малоцикловую усталость

Номер обр.	Эскиз образца	Кол-во циклов до наступления этапа разрушения		Примечание
		I	II	
1 2 3	Рис. 1.	400 400 300	7500 5600 5800	Соединения с симметричными угловыми швами
4 5 6	Рис. 2.	800 400 500	8800 7000 7500	Соединения с подкрепляющим швом
7 8 9	Рис. 2.	500 1300 2100	11900 12400 15200	Соединения с подкрепляющим швом, зона перехода к основному металлу переплавлена в аргоне
10 11	Основной металл	2100 3800	15900 14200	

Примечание: I – выявление трещин на линии сплавления; II – нарушение герметичности.

Для соединений с подкрепляющим швом после переплава зоны перехода от шва к основному металлу в среде аргона долговечность сварных соединений по зарождению разрушения в 5-7 раз выше, чем у соединений с равными катетами, а по моменту потери герметичности аналогичны долговечности основного металла. Полученные результаты хорошо согласуются с данными работ [1, 3, 4, 5].

Результаты эксперимента показывают, что процесс разрушения сварного соединения «штуцер-лист», выполненного по базовой технологии (см. рис.1), начинается на ранней стадии нагружения как со стороны растянутых, так и со стороны сжатых волокон. Характерным для малоцикловой усталости сварных соединений «штуцер-лист» является практически одновременное зарождение большого числа трещин в наиболее грубых переходах от металла шва к основному металлу листа на линии сплавления. Дальнейшее развитие разрушения происходит путем увеличения отдельных трещин, появления новых и их слияния в одну магистральную. Особенностью развития разрушения таких соединений являются то, что к моменту потери герметичности сварного соединения приводит совместное развитие трещин, как с растянутых, так и со сжатых волокон. Однако скорость развития трещин со стороны сжатых волокон ниже, чем со стороны растянутых волокон. Обычно трещины со стороны сжатых волокон к моменту потери герметичности успевают пройти приблизительно 10-12% толщины основного металла.

В начальный период нагружения наблюдается в основном увеличение длины трещины при незначительном развитии ее в глубину. Последнее подтверждается крайне малым раскрытием круговой магистральной трещины в начальный период ее формирования.

Предложенная конструкция, по сравнению с базовой, имеет следующие преимущества:

- трещины на растянутых волокнах возникают значительно позже, поскольку уменьшено напряженно-деформированное состояние в зоне перехода от шва к основному металлу;

- возросла сопротивляемость развитию разрушения, так как источники зарождения разрушения находятся в разных плоскостях. На объединение таких трещин требуется значительно большее количество циклов нагружения.

Выводы:

1. Представленные результаты свидетельствуют о целесообразности применения подхода к анализу напряженного состояния, основанного на разделении поля напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу на составляющие, связанные с макрогеометрией, конфигурацией конструкции в целом и с микрогеометрией зоны перехода от шва к основному металлу.

2. Данный подход позволяет выделить составляющую, «ячейку», в которой локальная геометрия и локальные свойства полностью зависят от технологии сварки. Эта составляющая, связанная с микрогеометрией зоны

перехода от шва к основному металлу, ответственна за стадию зарождения усталостного разрушения и не зависит от геометрии сварного соединения в целом. Геометрия остальной части сварного соединения влияет на уровень напряжений в «ячейке» подобно внешней нагрузке. Таким образом, получив характеристики усталостной прочности для любого сварного соединения, содержащего такую «ячейку», можно путем пересчета распространить на другое сварное соединение, отличающееся глобальной геометрией сечения.

3. Рассмотренный подход позволяет найти пути раздельного влияния на каждую составляющую, расширяет возможности в поисках методов снижения напряженно-деформированного состояния конструкции за счет изменения конструктивных параметров соединения и технологических приемов и позволяет получить требуемую долговечность конструкции.

4. На примере сварного соединения «штуцер-лист» показана возможность повышения долговечности в 1,5-3 раза за счет целенаправленного изменения макрогеометрии соединения.

5. Теоретический и экспериментальный анализ распределения напряжений на поверхности соединений типа «штуцер-лист» с подкрепляющим швом наглядно доказывает возможность раздельного управления напряженным состоянием в зоне предполагаемого разрушения за счет изменения глобальной и локальной геометрии конструкции.

Библиографический список

1. Исследование малоцикловой усталости сварных соединений типа «вварыш-лист»/ Ю.Г.Людмирский, В.В. Напрасников и др.: отчет о НИР, хоздоговор № 1173/792-77 /РИСХМ. – Ростов н/Д. – 1978.

2. *Лукьянов В.Ф., Людмирский Ю.Г., Напрасников В.В.* Испытание элементов корпусных конструкций при двухосном напряженном состоянии // Заводская лаборатория. – 1986. – №7. – С. 63-65.

3. *Лукьянов В.Ф., Людмирский Ю.Г., Напрасников В.В.* Малоцикловая усталость сварных штуцерных соединений // Сварочное производство. – 1982. – №12. – С.26-28.

4. *Лукьянов В.Ф.* Влияние геометрической неоднородности сварных швов на долговечность штуцерных соединений / В.Ф. Лукьянов, Ю.Г. Людмирский, В.В. Напрасников // Надежность и долговечность машин и сооружений. – Киев. – 1983. – Вып. 4. – С.63-67.

5. *Лукьянов В.Ф., Напрасников В.В. и др.* Долговечность сварных соединений в малоцикловой области при двухосном напряженном состоянии // Автоматическая сварка. – 1989. – №6. – С.16-20.

Материал поступил в редакцию 02.06.08.

U.G. LUDMIRSKIY, A.A. PARKHOMENKO

METHOD OF ESTIMATION STRESSES CONDITION IN FRONT OF THE TOE

In article the approach to the analysis of an intense condition of a design based on division of stress on stress connected with the structural stress, a configuration of a design as a whole and with microgeometry in front of the toe, the notch stress is considered. Results of increase of fatigue durability pipe connections are submitted by change of their constructive form based on the given approach.

ЛЮДМИРСКИЙ Юрий Георгиевич (р.1940), профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ДГТУ, доктор технических наук (2002). Окончил РИСХМ (1962) по специальности «Оборудование и технология сварочного производства».
Научные интересы лежат в области роботизации сварочного производства, разработки способов снижения сварочных деформаций, напряжений и повышения работоспособности сварных конструкций.
Автор более 120 работ.

ПАРХОМЕНКО Александр Александрович (р.1983), аспирант кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ДГТУ. Окончил ДГТУ (2006).
Научные интересы связаны с технологией производства сварных конструкций, надежностью сварных соединений и мультимедийными технологиями.
Автор 9 научных работ.

УДК 669.017.16:539.384

В.Н. ПУСТОВОЙТ, В.В. МУЛЬЧИН, Ю.М. ДОМБРОВСКИЙ

КОНСТРУКТИВНАЯ ПРОЧНОСТЬ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ СО СТРУКТУРОЙ ЕСТЕСТВЕННОГО ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОГО КОМПОЗИТА

Приведены результаты экспериментов по определению процессов развития усталостной трещины в трубных сталях со структурой естественного ферритно-мартенситного композита (ЕФМК). Показано, что достижение повышенной конструктивной прочности обусловлено особым механизмом распространения трещины у сталей со структурой ЕФМК.
Ключевые слова: *естественный ферритно-мартенситный композит, циклическая трещиностойкость, механизм распространения трещины.*

Введение. Работоспособность и надежность трубопроводов высокого давления, трубных конструкций в нефтегазодобывающей промышленности из малоуглеродистых и низколегированных сталей определяется энергоемкостью процесса развития трещин. Поэтому конструктивная вязкость металла, то есть вязкость при наличии трещин, является определяющей и характеризует способность металла сопротивляться развитию трещины.

Изучали поведение трещины в сталях марок 20, 17ГС, 35ГС со структурой естественного ферритно-мартенситного композита, которую получали закалкой из межкритической области температур (A_1-A_3) сталей со строчечным строением феррита и перлита. Температуру закалки выбирали из соображений получения объемной доли мартенсита в ЕФМК 20-25%, так как известно [1], что при большой объемной доле мартенсита, увеличении при этом предела текучести и уменьшения размера зоны пластической деформации, работа разрушения уменьшается.

Методика исследования. Кинетику развития усталостной трещины исследовали при циклических испытаниях призматических образцов на установке [2], собранной на базе вибростенда ST-600 со специальным стабилизатором амплитуды колебаний. Возникновение и последующее развитие трещины регистрировали методом электропотенциалов [3] в координатах "разность потенциалов – время". Эту зависимость потом расшифровывали с помощью тарировочного графика в соответствии с размерами сечения образца и длиной усталостной трещины.

Диаграммы усталостного разрушения строили в логарифмических координатах dl/dN - $lg\Delta K$ [4], где dl/dN - скорость роста трещины на величину l за N циклов; ΔK - размах коэффициента интенсивности напряжений. Величину ΔK определяли как разницу между максимальным и минимальным значениями коэффициента интенсивности напряжений при циклических колебаниях

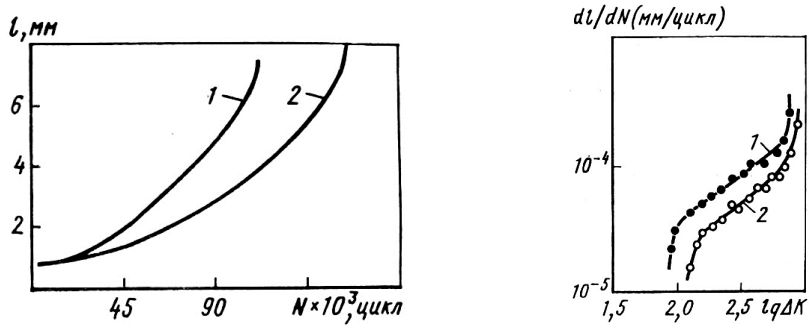
$$\Delta K = K^{Ц}_{1_{C\max}} - K^{Ц}_{1_{C\min}}, \qquad (1)$$

а соответствующее значение $K_{1C}^{Ц}$ вычисляли по формуле [5]:

$$K_{1C}^{Ц} = \sigma\sqrt{\pi \cdot l}\,, \qquad (2)$$

где σ - максимальное напряжение, возникающее при циклическом изгибе призматического образца с трещиной длины l.

Результаты эксперимента. На рис.1,а показана зависимость длины усталостной трещины от числа циклов испытания. Видно, что скорость развития трещины в образцах со структурой ЕФМК (по сравнению с горячекатаным состоянием) значительно ниже, а окончательное разрушение образца происходит через более длительный период времени и на него затрачивается большее число циклов изгиба. На рис.1,б представлены кинетические диаграммы усталости, из рассмотрения которых очевидно, что для стали со структурой ЕФМК при одинаковом уровне размаха коэффициента интенсивности напряжения ΔK скорость развития трещины существенно ниже, чем у стали, имеющей неупорядоченную ферритно-перлитную структуру (горячекатаное состояние), окончательное разрушение образца происходит при большей критической длине усталостной трещины $l_{кр}$ и большей циклической вязкости разрушения $K_{1C}^{Ц}$ (табл.1).



а) б)

Рис.1. Зависимость длины усталостной трещины от числа циклов знакопеременного изгиба для стали 17ГС (а) и кинетические диаграммы развития усталостной трещины в стали 20 (б): 1 – горячедеформированное состояние; 2 – структура ЕФМК

Таблица 1

Параметры циклической вязкости разрушения

Марка стали	$K_{1C}^{Ц}$	$K_0^{Ц}$	$l_{кр}$, мм	Число циклов до разрушения N×10³
	МН/м$^{3/2}$			
Сталь 20	$\frac{70,2\pm1,0}{85,1\pm1,0}$	$\frac{9,0\pm0,4}{11,0\pm0,4}$	$\frac{7,10\pm0,05}{8,80\pm0,05}$	$\frac{122\pm10}{177\pm10}$
Сталь 17ГС	$\frac{68,2\pm1,0}{81,4\pm1,0}$	$\frac{8,4\pm0,4}{9,8\pm0,4}$	$\frac{6,75\pm0,05}{7,90\pm0,05}$	$\frac{110\pm10}{152\pm10}$
Сталь 35ГС	$\frac{51,2\pm1,0}{63,3\pm1,0}$	$\frac{5,2\pm0,3}{6,6\pm0,3}$	$\frac{4,93\pm0,05}{5,88\pm0,05}$	$\frac{116\pm10}{167\pm10}$

Примечания: 1. В числителе - горячекатаное состояние, в знаменателе - ЕФМК.
2. Показаны доверительные интервалы для P=0,95 и n=5.

Существует точка зрения [4, 6], что циклическую вязкость разрушения целесообразно определять не по критическому значению коэффициента интенсивности напряжений, соответствующему предельному состоянию, а по пороговому значению этого коэффициента $K_0^{Ц}$, отвечающему страгиванию магистральной трещины по механизму отрыва при детерминированной степени стеснения пластической деформации. Из табл.1 видно, что значение $K_0^{Ц}$ у образцов со структурой ЕФМК также повышается по сравнению с хаотичной ферритно-перлитной структурой.

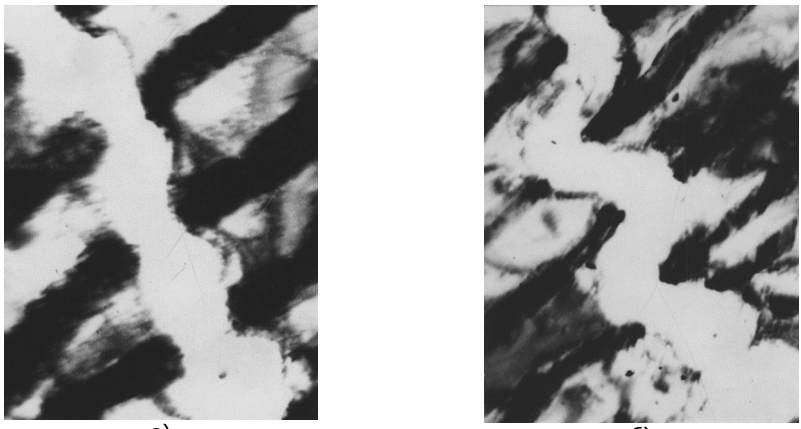
Обсуждение результатов. Данные экспериментов убедительно доказывают, что естественный ферритно-мартенситный композит отличают существенно повышенные характеристики трещиностойкости. Объяснение этому следует искать в особой структурной организации "сэндвичеподобного" типа с практически идеально параллельном расположением слоёв пластичной матрицы (феррита) и слоёв упрочняющей фазы (мартенсита) [7]. В такой структуре появлению трещины предшествует предварительная значительная пластическая деформация ферритной матрицы, образование плоского скопления дислокаций возле межфазной границы феррит – мартенсит, что приводит (при достижении в этих микрообъёмах локального перенапряжения) к образованию трещины в мартенситной пластине. Увеличение числа таких трещин на единицу объёма пропорционально приращению пластической деформации. Поэтому микротрещина отрыва может возникнуть только от таких мартенситных трещин, длина которых достаточно большая, чтобы при соответствующем уровне напряжений удовлетворять условию Гриффитса-Орована:

$$\sigma_t \geq [\frac{2E\gamma_{эфф}}{\pi(1-\nu^2)L}]^{\frac{1}{2}}, \qquad (3)$$

где σ_t – растягивающее напряжение в семействе потенциальных плоскостей отрыва; E – модуль Юнга; $\gamma_{эфф}$ – эффективная поверхностная энергия (включая энергию пластического деформирования); ν – коэффициент Пуассона; L – полная длина трещины в мартенситной пластине, а не половина длины, так как трещина Гриффитса этого типа вызывает микротрещину отрыва в ферритном промежутке подобно внешнему острому надрезу.

В связи с этим можно провести известную аналогию процесса разрушения стали со структурой ЕФМК и стали со структурой пластинчатого перлита. В первом случае имеет значение соотношение объёмных долей мартенсита и феррита, а следовательно, поведение трещин, образующихся при разрыве мартенситных волокон, а во втором – межпластиночное расстояние в эвтектоиде. В результате растрескивания мартенситных пластин большой толщины или крупных карбидов возникает "быстрая" магистральная трещина (рис.2,а), что соответствует низкому уровню разрушающих напряжений. При уменьшении межпластиночного расстояния (и утонении карбидных пластин) число карбидных трещин на единицу объёма увеличивается, но уменьшается вероятность инициирования ими микротрещин в феррите, так как эти трещины не отвечают условию (3). Такие докритические трещины при увеличении напряжения остаются неактивными из-за их затупления [8], и процесс разрушения контролируется развитием сдвига в феррите, вызывающем растрескивание соседних карбидных пластин, ветвление и слияние трещин, при котором трещина двигается в продольном

(по отношению к карбидной пластине) направлении, а также образование пор в феррите (рис.2,б), т.е. происходит по схеме, предложенной в работе Л.Миллера и Д.Смита [9].



а) б)

Рис.2. Зависимость внешнего вида трещины от межпластиночного расстояния в эвтектоиде. Фольга, × 5500

Ориентируясь на рассмотренную аналогию, можно утверждать, что в сталях со структурой ЕФМК увеличение объемной доли упрочняющей фазы в композиции должно вызывать уменьшение работы разрушения материала. Это вызвано увеличением предела текучести и уменьшением величины зоны пластической деформации [1]. В случае оптимального значения величины объёмной доли упрочняющей фазы (~ 20-25% [1]), при распространении трещины поперёк направления армирования работа разрушения, главным образом, определяется природой металлической матрицы и размерными соотношениями частиц армирующей фазы. В работе [10] показано, что в композиционных материалах с ориентированной упрочняющей фазой затруднено расслоение вдоль волокон до разрушения сдвигом в этом направлении. До того, как прочное волокно разорвется перед фронтом трещины, освободив тем самым путь к её движению, должна продеформироваться сдвигом матрица. Наличие достаточно больших сдвигов в матрице параллельно волокнам снижает концентрацию напряжений перед концом распространяющейся перпендикулярно волокнам трещины, что затрудняет её распространение как хрупкой.

Механизм вязкого разрушения, который характерен для исследуемых сталей со структурой ЕФМК, работает путем зарождения, роста и коалесценции пор (рис.3,а). В процессе усталостного нагружения в условиях знакопеременного изгиба в материале образуется значительное количество вакансий, возникающих при пересечении дислокаций, а также при скольжении дислокаций с порогами [11]. Объединение единичных вакансий с образованием поры происходит в плоскости скольжения. Под действием нормальных напряжений на поверхности микропор оседают вакансии и в результате этого пора постепенно трансформируется в трещину (рис.3,б).

Дальнейшее развитие трещин зависит от особенностей структурной организации стали и, в первую очередь, от факторов, препятствующих движению трещины. Было проведено изучение траектории трещин, образующихся в тонких фольгах сталей с хаотичным расположением зерен

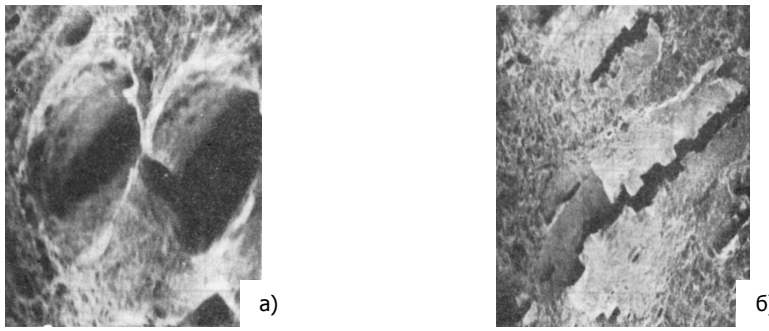


Рис.3. Пора в изломе (а, ×1200) и образование трещины из пор (б, ×500) в стали 35 ГС со структурой ЕФМК (РЭМ)

феррита и перлита, и сталей со структурой ЕФМК. Параметры траектории таких трещин очень чувствительны к структуре [12] и могут характеризовать эффективность барьеров, препятствующих развитию трещины. Исследование было предпринято с целью характеристики структурных барьеров, возникающих в ЕФМК. Для этого вычисляли автокорреляционные функции (АКФ) [13] отклонения траектории трещины от её средней линии и первой производной её траектории. Наблюдения за трещинами в фольгах показали, что независимо от характера структуры трещины развиваются одинаково, то есть каждый их проход через внутренние поверхности раздела (межфазные границы, границы зерен, границы перлитных колоний, пластины мартенсита и феррита и т.п.) сопровождается изменением траектории. Таким образом, изменение траектории трещины является случайным процессом. Вычисленные АКФ отклонения траектории трещины от средней линии и первой производной её траектории (рис.4), которые характеризуют угловые параметры искривления следа трещины при её распространении в фольге, позволили оценить влияние структурной организации ЕФМК на статистические параметры микротрещины для стали 20 (табл.2).

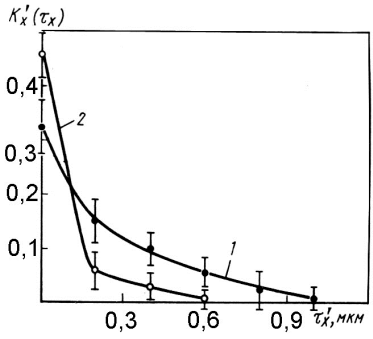


Рис.4. Автокорреляционные функции наклона микроучастков траектории трещины к её средней линии: 1 – хаотичная ферритно-перлитная структура; 2 – ЕФМК, сталь 20

Таблица 2

Статистические характеристики микротрещины длиной 6 мкм

Структура	$\sqrt{K_x(0)}$	$\tau_x(0)$	$\sqrt{K'_x(0)}$	$\tau'_x(0)$
Горячекатаная сталь с хаотичной структурой феррит-перлит	0,157 ± 0,03	1,4 ± 0,2	0,57 ± 0,04	1,0 ± 0,3
ЕФМК	0,135 ± 0,03	1,0 ± 0,15	0,77 ± 0,03	0,4 ± 0,2

Примечание: $K_x(0)$ - величина среднего квадрата отклонения траектории трещины от её средней линии; $K'_x(0)$ - величина среднего квадрата тангенсов углов наклона траектории к её средней линии (характеризует большую или меньшую микроизвилистость трещины); $\tau_x(0)$ и $\tau'_x(0)$ - соответственно интервалы корреляции функции линейного отклонения и тангенсов углов наклона траектории трещины к её средней линии (характеризуют, на какое расстояние распространяется трещина под действием однажды подействовавшего на неё фактора).

Как видно из табл.2, у стали со структурой ЕФМК заметно изменяются все статистические параметры микротрещины. Согласно полученным данным, среднеквадратичные значения тангенса углов наклона микроучастков траектории трещины к её средней линии у стали со структурой ЕФМК возрастает до 0,77 против 0,57 у горячекатаной стали, что соответствует увеличению среднего значения модуля наклона траектории трещины с 29° до 38°. При этом интервал корреляции уменьшается с 1 до 0,4 мкм. Это свидетельствует о том, что структура ЕФМК обеспечивает увеличение микроизвилистости трещины, которая характеризуется повышенной крутизной изгибов траектории в силу особого механизма распространения трещины в ориентированной структуре, содержащей прочные волокна и пластичную матрицу.

Выводы. Экспериментально показано и теоретически обосновано повышение характеристик конструктивной прочности трубных сталей со структурой естественного ферритно-мартенситного композита, что обусловлено особым механизмом торможения движения трещины и увеличением микроизвилистости её траектории.

Библиографический список

1. *Келли А.* Высокопрочные материалы / А.Келли. – М.: МИР, 1976. – 261 с.

2. *Гришин С.А.* Установка для исследования кинетики развития усталостной трещины / С.А. Гришин // Прогрессивные методы термического упрочнения в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении. – Ростов н/Д, 1982. – С. 15-20.

3. *Сорокин В.Л., Змитрук В.Ф., Шербединский Г.В. и др.* Применение электропотенциального метода для определения характера развития трещины // Заводская лаборатория. – 1981. – Т.47. – №12. – С. 60-62.

4. *Иванова В.С.* Концепция циклической вязкости разрушения /В.С.Иванова // Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов. – М.: Наука, 1981. – С.5-19.

5. *Иванова В.С.* Разрушение металлов / В.С.Иванова. – М.: Металлургия, 1979. – 168 с.

6. *Гуревич С.Е.* Некоторые аспекты усталостной механики разрушения / С.Е.Гуревич // Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов. – М.: Наука, 1981. – С.19-38.

7. *Мульчин В.В.* Характеристики трещиностойкости трубной стали 20 со структурой естественного ферритно-мартенситного композита / В.В.Мульчин, Д.С.Ломоносов // Вестник ДГТУ. – 2007. – Т.7. – №4 (35). – С.480-484.

8. *Коэн М.* Статистический анализ начала разрушения отрывом в железе при разрушении карбидов / М.Коэн, М.Р. Вуцкевич // Физика прочности и пластичности. – М.: Металлургия, 1982. – С.258-268.

9. *Miller L.E., Smith G.S.* Tensile fractures in carbon steels//Journal of the Iron and Steel Institute, 1970. – V. 208. – №11. – P.998-1005.

10. *Таран А.В.* Природа разрушения высокопрочных материалов // МиТОМ, 1971. – №1. – С.55-61.

11. *Коцаньда С.* Усталостное разрушение металлов; пер. с польск. / С.Коцаньда. – М.: Металлургия, 1976. – 456 с.

12. *Бернштейн М.Л.* Прочность стали / М.Л.Бернштейн. – М.: Металлургия, 1974. – 199 с.

13. *Хусу А.П.* Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход)/ А.П.Хусу, Ю.Р.Витенберг, В.А.Пальмов. – М.: Наука, 1975. – 292 с.

Материал поступил в редакцию 11.07.08.

V.N. PUSTOVOIT, V.V. MULCHIN, J. M. DOMBROVSKI

CONSTRUCTIVE STRENGTH OF THE TUBE STEEL WITH STRUCTURE OF THE NATURAL FERRIT-MARTENSITIC COMPOSITE MATERIAL

Results of experimental determination of the processes of development fatigue crack in tube steel with structure of the natural ferrit-martensitic composite material (NFMC) are presented. It is shown that achievement of constructive heavy-duty is caused by special mechanism of the spreading crack in steel with structure of NFMC.

ПУСТОВОЙТ Виктор Николаевич (р.1940), заведующий кафедрой «Физическое и прикладное материаловедение» ДГТУ, доктор технических наук (1980), профессор. Окончил РИСХМ (1962). Заслуженный деятель науки РФ.
Область научных интересов: физические и технологические основы методов упрочнения сталей и сплавов.
Имеет более 300 научных публикаций.

МУЛЬЧИН Василий Васильевич (р.1955), заместитель начальника трубопрокатного цеха Таганрогского металлургического завода, соискатель кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ДГТУ.
Область научных интересов: физические и технологические основы методов улучшения характеристик механических и эксплуатационных свойств трубной стали ответственного назначения.
Имеет 3 научные публикации.

ДОМБРОВСКИЙ Юрий Маркович (р.1944), профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ДГТУ, доктор технических наук.
Область научных интересов: физические и технологические основы методов упрочнения сталей и сплавов.
Автор более 80 научных работ.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. Статья должна быть представлена в двух экземплярах, распечатанных через 1,5 интервала на белой бумаге формата А4, ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 14.

2. Текст статьи представляется также на магнитном носителе (дискета, CD-диск) в формате текстового редактора "Word for Windows 6.0" или передается по электронной почте.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности: инициалы и фамилии авторов; полное название статьи; краткая (3-6 строк) аннотация; ключевые слова (3 – 8). Затем идет текст самой статьи, библиографический список.

4. Дополнительно к статье должен быть представлен реферат на английском языке, включающем инициалы, фамилию автора и полное название статьи.

5. Статья должна предусматривать разделы: Введение, Постановка задачи, Методы испытаний, Результаты эксперимента и их обсуждение, Выводы или Заключение.

6. Объем статьи не должен превышать 16 страниц машинописного текста, 5 рисунков или фотографий; обзора - 25 страниц, 10 рисунков; краткого сообщения - не более 3 страниц, 2 рисунков.

7. Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров "Excel", "Quattro Pro", "MS Graph". Каждый рисунок должен иметь подпись. Рисунки должны иметь контрастное изображение. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь заголовок. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в формульном редакторе MS Word.

8. Размерность физических величин, используемых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.).

9. Библиографический список должен включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг - фамилии и инициалы авторов, название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

10. На отдельной странице должны быть представлены краткие сведения об авторах статьи (год рождения, год присвоения степени и звания, название вуза и год его окончания, должность, область научных интересов, количество публикаций).

11. Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

12. Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются, рукописи и магнитные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлегией окончательного текста статьи.